

ROGÉRIO DE SOUZA VERSAGE

VENTILAÇÃO NATURAL E DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS
VERTICAIS MULTIFAMILIARES EM CAMPO GRANDE, MS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, Ph.D.

Florianópolis

2009

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

V561v Versage, Rogério de Souza

Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios
verticais multifamiliares em Campo Grande, MS [dissertação]
/ Rogério de Souza Versage ; orientador, Roberto Lamberts.
- Florianópolis, SC, 2009.
96 f.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação
em Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura. 2. Desempenho térmico. 3. Edifício
multifamiliar. 4. Ventilação natural. 5. EnergyPlus. I.
Lamberts, Roberto. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

CDU 72

RESUMO

A crise energética e ambiental exige o consumo racional da energia. No Brasil, quase metade da energia elétrica é consumida principalmente no condicionamento ambiental das edificações. E no setor residencial, as estratégias de ventilação natural proporcionam grande potencial para obtenção de conforto térmico, contribuindo na economia de energia ao evitar o uso de condicionamento artificial. Como contribuição ao entendimento deste potencial, este trabalho tem como objetivo avaliar a ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares através de simulações com o modelo de rede *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*, adotando o clima da cidade de Campo Grande, MS. Para o desenvolvimento desta avaliação foram estudados os conceitos sobre coeficientes de descarga, coeficiente de pressão do vento, coeficiente e expoente de fluxo de ar pelas frestas e rugosidade do entorno. Assim como foram estudados os fundamentos dos métodos de cálculo de taxas de ventilação e infiltração de ar em edificações. Para identificar a influência da variação destes parâmetros de ventilação no desempenho térmico foram realizadas simulações paramétricas em um modelo de edifício referencial respeitando as limitações de obtenção de cada coeficiente, sendo observada a influência da variação dos parâmetros nas taxas de ventilação e graus hora de refrigeração. Após conhecer esta influência foi avaliado o desempenho de um edifício real buscando transpor as restrições de modelagem e determinação de cada coeficiente. O edifício real estudado é uma amostra intencional de uma tipologia de edifício multifamiliar comum na cidade de Campo Grande, com quatro apartamentos por andar e planta com formato “H”. O edifício real foi avaliado por dois métodos diferentes: um padrão, adotando todos os parâmetros *default* indicados pelo *EnergyPlus*, e outro avançado, com os parâmetros de ventilação determinados de forma mais detalhada. A avaliação do desempenho térmico do edifício real, seus apartamentos e ambientes foram analisados através de uma escala de graus hora de refrigeração da temperatura do ar externo, classificando o seu desempenho entre “A” e “E”. Na análise paramétrica do modelo referencial, o coeficiente de descarga foi o parâmetro que mais influenciou no desempenho térmico de graus hora de refrigeração e os coeficientes e expoentes de fluxo de ar pelas frestas e os diferentes métodos de obtenção de coeficientes de pressão de vento apresentaram a menor influência nos resultados de desempenho térmico. Entre a simulação padrão e avançada do edifício real não se pôde concluir qual dos resultados é o mais correto, porém, comparando o comportamento simulado, as duas simulações apresentaram a mesma tendência de resultados. No resultado da classificação do edifício real, seus apartamentos foram classificados como “B” e “C”, resultando em um desempenho médio do edifício completo como “B”. Contudo, além das constatações quanto ao desempenho dos edifícios estudados, este trabalho permitiu verificar o funcionamento da simulação de ventilação natural com o modelo *AirflowNetwork* do *EnergyPlus*.

Palavras chave: Desempenho térmico; Edifício multifamiliar; Ventilação natural; *EnergyPlus*.

ABSTRACT

Energy and environmental crisis requires rational energy consumption. In Brazil, electrical energy is consumed mainly in environmental conditioning of buildings. In residential sector, natural ventilation strategies offer great potential for thermal comfort, contributing in energy savings to avoid the use of artificial conditioning. This work aims to evaluate the natural ventilation and thermal performance of vertical apartment building as a contribution to understanding this potential. The EnergyPlus simulation with AirflowNetwork model was used to evaluations, and the climate at Campo Grande city was adopted. For the development of this evaluation were studied concepts about discharge coefficients, crack airflow coefficients and exponents, wind pressure coefficient and nearby roughness. As well as were studied the basics of calculation methods of ventilation rates and air infiltration in buildings. To identify the influence of these parameters variation in thermal performance were carried parametric simulations with a referential building model with regard to each coefficient to assess the influence of the parameters variation in the rates of ventilation and cooling degree hour. After this, a real building was evaluated transposing restrictions of each coefficient determination. The real building studied is a sample of a common typology of apartment building in Campo Grande city, with four apartments by floor and plant with the "H" format. The real building was assessed by two different methods: a standard simulation, embracing all default parameters indicated by EnergyPlus, and Advanced simulation with more detailed ventilation parameters. In the assessment of the real building thermal performance, their apartments and rooms were analysed through a range of cooling degrees hour of external air temperature, categorizing your performance between "A" and "E". In parametric analysis of referential model, the discharge coefficient was most influenced parameter in thermal performance of cooling degrees hour and the crack airflow coefficients and exponents parameter and the different methods of obtaining wind pressure coefficients have less influence in thermal performance results. Between standard and advanced simulation of real building could not conclude which results is the correct, however, comparing the simulated behavior, the two simulations trend to the same results. In the result of real building classification, their apartments were classified as "B" and "C", resulting in a building average performance as "B". However, in addition to the findings in the studied buildings performance, this work enabled verifies the operation of EnergyPlus simulation with natural ventilation by AirflowNetwork model.

Keywords: thermal performance; natural ventilation; apartment building; *EnergyPlus*.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, José Versage Neto, pelos conselhos, incentivo e amor que me dão forças para permanecer firme em minha caminhada.

A minha mãe, Hélia de Souza Versage, que sempre rezou por mim, torcendo para que eu alcançasse meus objetivos.

Ao querido amigo, professor Wagner Augusto Andreasi, que no Lade/UFMS orientou meus primeiros passos na pesquisa acadêmica, acendendo meu interesse para este mestrado.

Ao meu orientador professor Roberto Lamberts, pela maestria nas orientações, conduzindo pacientemente meu desenvolvimento como pesquisador.

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente aceitaram participar e contribuir para a avaliação, aperfeiçoamento e conclusão desta pesquisa.

Aos amigos e companheiros de pesquisa do LabEEE Miguel, Márcio, Joyce, Martin, Marina, Andréa, Solange, Ana Paula, Isabel, Mariana, Cláudia, Juliana, Deivis, Trajano, Jair, Clarissa, Isis, Greici, Vinícius e Renata, parceiros para descontração e discussões científicas.

Aos queridos amigos do LabCon Evelise, Carolina, Raphaela, Gianni, Roberto Carlos, Marcus pela calorosa acolhida em seu meio, que fez toda diferença na minha vida em Florianópolis.

Aos professores Roberto Lamberts, Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Elvira Viveiros, Eneid Ghisi, Luiz Gómez, Sonia Afonso pelas disciplinas ministradas com grande competência.

A Ivonete, pela assistência atenciosa na secretaria do PosArq.

A Joyce, pelas contribuições a minha pesquisa, paciência e agradável companhia.

Aos amigos Luiz Adivé Palmeira e Renato Donizete Versage, que juntos ao meu pai trouxeram-me amizade, paz e prosperidade ao me apresentar a uma grande família em Florianópolis.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação.

SUMÁRIO

1.	Introdução	13
1.1.	Justificativa e relevância do tema	13
1.2.	Objetivos	15
1.2.1.	Geral	15
1.2.2.	Específicos	15
2.	Fundamentação teórica	16
2.1.	Infiltração e Ventilação Natural	16
2.1.1.	Efeito Chaminé	17
2.1.2.	Ação dos ventos	17
2.1.3.	Efeito Combinado	19
2.2.	Parâmetros de Ventilação Natural	19
2.2.1.	Coeficientes de pressão	19
2.3.	Coeficiente de descarga	27
2.4.	Coeficiente e Expoente de fluxo de massa de ar pelas frestas	28
2.4.1.	Rugosidade do entorno	31
2.5.	Métodos de determinação de Taxas de infiltração e ventilação	33
2.5.1.	Modelos de Rede	33
2.5.2.	Modelos CFD	35
2.5.3.	Modelo AirlfowNetwork do <i>EnergyPlus</i>	35
2.5.4.	Métodos combinados	36
2.6.	Considerações finais do capítulo	37
3.	Procedimentos metodológicos	38
3.1.	O programa EnergyPlus	38
3.2.	Clima de Campo Grande	39
3.3.	Análise de influência dos parâmetros de ventilação	41
3.3.1.	Definição do Modelo experimental	41
3.3.2.	Cargas internas e padrões de uso	45
3.3.3.	Padrão de Ventilação	49
3.3.4.	Conferência do modelo	49
3.3.5.	Parâmetros de ventilação adotados para análise	49
3.3.6.	Análise de Influência dos parâmetros de ventilação	51
3.3.7.	Análises de desempenho	52
3.3.7.1.	Desempenho de ventilação	52
3.3.7.2.	Desempenho térmico	53
3.4.	Desempenho térmico de modelo de edifício real	53
3.4.1.1.	Descrição do Modelo Real	53
3.4.1.2.	Detalhamento das aberturas	56
3.4.2.	Características de uso e ocupação	59
3.4.3.	Simulações	61
3.4.3.1.	Coeficientes de Pressão de vento	62
3.4.3.2.	Coeficientes de Descarga das aberturas	62
3.4.3.3.	Coeficientes e expoente de Frestas	63
3.4.4.	Análise de influência dos parâmetros de ventilação	64
3.4.5.	Análise de desempenho térmico do edifício	65
4.	Resultados e discussões	67
4.1.	Modelo Experimental	67

4.1.1.	Coeficientes de descarga.....	67
4.1.2.	Coeficiente e expoente de frestas	69
4.1.3.	Rugosidade do entorno	72
4.1.4.	Coeficientes de Pressão	73
4.1.5.	Casos de parâmetros extremos	75
4.1.6.	Influência dos parâmetros de ventilação	77
4.2.	Modelo Real	79
4.2.1.	Influência dos parâmetros de ventilação	79
4.2.2.	Desempenho térmico do edifício	82
4.2.3.	Avaliação do comportamento do modelo real	84
5.	Conclusões	90
5.1.	Limitações do trabalho	91
5.2.	Recomendações para trabalhos futuros	92
6.	Referencias Bibliográficas	93

Lista de Figuras

Figura 2.1. Comportamento do vento ao redor de um edifício retangular	18
Figura 2.2. CPs para diferentes ângulos de ataque sobre uma fachada.....	20
Figura 2.3. Exemplo de distribuição de pressão de vento sobre um sólido	21
Figura 2.4. Exemplo de tabela de coeficientes de pressão de vento	23
Figura 2.5. Validação do modelo matemático de Sharag-Eldin(2007).....	25
Figura 2.6. Exemplo de resultado obtido com o TNO CP Generator	26
Figura 2.7. CPs a 0° sobre modelo da base de dados de Tóquio	26
Figura 2.8. Perfil de rugosidade de diferentes entornos urbanos	32
Figura 2.9. Planta esquemática de um edifício com sua rede de fluxo de ar	34
Figura 3.1. Temperaturas de bulbo seco do arquivo climático de Campo Grande. ...	40
Figura 3.2. Frequência, direção e velocidade dos ventos em Campo Grande	40
Figura 3.3. Proporção limitada pelos pré-requisitos para estimativa de CPs.....	42
Figura 3.4. Planta do modelo experimental	43
Figura 3.5. Esquema volumétrico do modelo experimental	43
Figura 3.6. Padrão de ocupação para dia útil	45
Figura 3.7. Padrão de ocupação em fins de semana	46
Figura 3.8. Uso de iluminação em dia útil	46
Figura 3.9. Uso de iluminação fins de semana	47
Figura 3.10. Uso de equipamentos em dia útil.....	48
Figura 3.11. Uso de equipamentos em dia útil.....	48
Figura 3.12. Esquema e plantas do pavimento tipo e apartamento do Modelo real ..	54
Figura 3.13. Janela Maximo-ar.....	56
Figura 3.14. Janela com duas folhas de correr	57
Figura 3.15. Porta de duas folhas de correr.....	57
Figura 3.16. Janela tipo veneziana com três folhas de correr.....	58
Figura 3.17. Abertura de ventilação conforme temperatura interna e externa.....	58
Figura 3.18. Condições de abertura das janelas externas	59
Figura 4.1. Graus hora de refrigeração por coeficiente de descarga	69
Figura 4.2. Graus hora de refrigeração por coeficientes e expoentes de frestas	71
Figura 4.3. Graus hora de refrigeração pela rugosidade do entorno	73
Figura 4.4. Graus hora de refrigeração por fonte de coeficiente de pressão	75
Figura 4.5. Graus hora de refrigeração para o melhor e pior caso	77
Figura 4.6. Influência da variação dos parâmetros no desempenho térmico	78
Figura 4.7. Graus hora de refrigeração padrão e avançado para cada ambiente.....	80
Figura 4.1. Grau de desempenho dos ambientes pela simulação avançada	83
Figuras 4.8 e 4.9. Temperaturas do dia mais quente. 1° Pav. e Cob.	85
Figuras 4.10 e 4.11. Temperaturas do dia mais frio. 1° Pav. e Cob.	86
Figuras 4.12 e 4.13. Temperaturas do dia com mais vento. 1° Pav. e Cob.	87
Figuras 4.14 e 4.15. Temperaturas do dia com menos vento. 1° Pav. e Cob.	88
Figuras 4.16 e 4.17. Temperaturas de um dia normal. 1° Pav. e Cob.	89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Exemplos de Cd por tipo de janela	28
Tabela 2.2. Expoente de fluxo de massa de ar.	29
Tabela 2.3. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de janelas	30
Tabela 2.4. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de portas	31
Tabela 2.5. Perfil de rugosidade de diferentes entornos.	32
Tabela 3.1. Paredes e coberturas adotadas no modelo experimental	44
Tabela 3.4. Padrão de utilização de equipamentos elétricos	47
Tabela 3.10. Paredes e coberturas adotadas no modelo experimental	55
Tabela 3.11. Síntese dos modelos real	56
Tabela 3.15. Características típicas de edificações multifamiliares brasileiras	60
Tabela 4.16. Padrão de uso de equipamentos adotados nos modelos 1 e 2	61
Tabela 3.17. Coeficientes e Expoentes de fluxo de massa de ar adotados	64
Tabela 3.18. Conjuntos de parâmetros simulados	65
Tabela 4.1. Médias anuais de ACH por coeficientes de descarga.....	68
Tabela 4.2. Graus hora de refrigeração por coeficientes de descarga.....	68
Tabela 4.3. Médias anuais de ACH por coeficientes e expoentes de frestas	70
Tabela 4.4. Graus hora de refrigeração por coeficientes e expoentes de frestas	71
Tabela 4.5. Médias anuais de ACH pela rugosidade do entorno	72
Tabela 4.6. Graus hora de refrigeração pela rugosidade do entorno	73
Tabela 4.7. Coeficiente de pressão normal a fachada por fonte.....	74
Tabela 4.8. Médias anuais de ACH por fonte de coeficiente de pressão	74
Tabela 4.9. Graus hora de refrigeração por fonte de coeficiente de pressão	75
Tabela 4.10. Parâmetros de ventilação adotados nos casos extremos.....	76
Tabela 4.11. Comparação entre melhor e pior caso.....	76
Tabela 4.12. Porcentagem de desvio padrão para a média.....	79
Tabela 4.13. Graus Hora de refrigeração da simulação avançada e padrão	81
Tabela 4.14. Diferença de graus hora de refrigeração avançado e padrão.....	81
Tabela 4.15. Escala Graus hora de refrigeração para classificação	82
Tabela 4.16. Graus hora de refrigeração por ambiente com escala de desempenho	82
Tabela 4.17. Média dos graus hora dos ambientes por apartamento	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa e relevância do tema

A crise do petróleo nos anos 70 desencadeou o desenvolvimento de diversas iniciativas focadas na avaliação e maximização da eficiência energética de edifícios e chamou a atenção para novas pesquisas e realizações no campo da energia. O surgimento e difusão dos conceitos de projetos ecológicos e eficientes foi uma das respostas mais importantes do setor técnico para reversão da crise ambiental. A necessidade de energia para o desenvolvimento leva ao desmatamento de florestas, à degradação do solo, à perda da biodiversidade e à poluição das águas e do ar. Esses desastres estão mudando a química da atmosfera e essas mudanças influem diretamente no clima (BARDOU e ARZOUMANIAN, 1981; BEHLING e BEHLING, 1996). Atualmente a crise ambiental ganha maior manchetes e vem preocupando o mundo, como destaca o IPCC, em Bates et al(2008), no Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, que fornece informações científicas, técnicas e sócio-econômicas para o entendimento das mudanças climáticas, seus impactos potenciais e opções de adaptação e mitigação. Como consequência, vemos a causa e efeito solicitarem os mesmos recursos: a busca por energia como causa e os impactos ambientais como efeito exigem um consumo racional de energia com a redução de perdas e eliminação do desperdício.

No ano de 2006, de acordo com o Balanço Energético Nacional, de toda energia elétrica consumida no Brasil, 45,2 % foram devidos aos setores residencial, comercial e público. Dentre esses segmentos, há uma forte concentração de uso de energia elétrica em residências, com 22,2% do consumo total, seguido do uso comercial, com 14,3%. (BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). Assim, quase a metade da energia elétrica do país é consumida principalmente nos sistemas de resfriamento, aquecimento e iluminação de edificações. Nesse contexto Lamberts et al. (1997) ressaltam que o consumo energético poderia ser reduzido se os arquitetos e engenheiros tivessem mais conhecimento sobre a eficiência energética na arquitetura.

Porém, controlar o crescimento do consumo de energia associado ao crescimento econômico do país requer uma série de medidas que racionalizem este consumo. Dentre estas medidas, normas e leis para promover a eficiência energética podem contribuir no setor de edificações residenciais, comerciais e públicas (LAMBERTS e CARLO, 2004). Iniciativas de trabalho em vários setores buscam desenvolver uma consciência comum da necessidade do uso racional de energia. Segundo Olofsson et al (2004), a classificação do desempenho energético de edificações está se tornando um aspecto de extrema importância como um fenômeno crescente já implantado por vários países. Os sistemas de classificação ajudam a diferenciar edifícios que são grandes consumidores de outros mais eficientes, fornecendo oportunidade para que medidas de conservação de energia sejam tomadas. No Brasil, as primeiras legislações instituídas para promover a eficiência energética surgiram como consequência da crise energética que atingiu o país em 2001. A Lei No 10.295, de 17 de outubro de 2001 dispõe sobre uma política nacional de conservação e uso racional de energia, e foi seguida pelo Decreto 4.059 de 19 de dezembro de 2001, que estabeleceu que níveis mínimos de eficiência energética deveriam ser

estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica. (LAMBERTS et al, 2007).

Em outubro de 2003 o PROCEL Edifica foi lançado contendo seis vertentes que visam criar bases para a eficiência energética em edificações e arquitetura bioclimática assim como manter atualizadas as legislações referentes. Dentre os projetos do PROCEL Edifica está o desenvolvimento do regulamento de eficiência energética em edificações, cujo desenvolvimento da base técnica ficou a cargo do LabEE/UFSC (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina) (LAMBERTS ET AL 2007).

Desse processo surgiu o regulamento com os requisitos técnicos necessários para etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos. Assim como, com particular atenção desta pesquisa, também está em desenvolvimento o regulamento de etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios residências.

No caso das edificações residenciais, as estratégias de ventilação natural são os principais meios de obtenção de conforto térmico através da renovação do ar, do resfriamento psicofisiológico e do resfriamento convectivo, contribuindo ainda na economia de energia ao evitar o uso de condicionamento artificial. Porém, segundo Kurabuchi et al (2005), para expandir o uso da ventilação natural e estabelecer uma aplicação efetiva da estratégia é necessário um entendimento profundo dos mecanismos de ventilação.

Algumas das deliberações do regulamento de etiquetagem residencial, principalmente em relação à ventilação natural, foram feitas por base nas simulações paramétricas de MATOS (2007), que simulou o desempenho da ventilação natural em edificações unifamiliares. Para novas constatações no projeto do regulamento de etiquetagem residencial, duas linhas de pesquisa de simulações de edifícios residenciais naturalmente ventilados estão em desenvolvimento no LabEEE/UFSC: uma para edifícios unifamiliares e outra para edifícios multifamiliares, sendo a segunda trazida a cargo, em partes, pelo presente trabalho.

Segundo o PNAD (2005), 15% das residências no Brasil são em habitações Multifamiliares. Apesar do número ainda pequeno, perspectivas futuras de urbanização e verticalização nos centros urbanos indicam este tipo de habitação como o mais promissor para vencer o déficit habitacional brasileiro. No entanto, edificações verticais multifamiliares podem apresentar um comportamento ambiental muito diferente de edificações térreas unifamiliares. A incidência de vento em diferentes alturas e as disposições dos apartamentos para diferentes orientações tornam os edifícios multifamiliares um objeto complexo em termos de ventilação natural. Ellis e Torcellini (2005) consideram que edifícios verticais colocam desafios peculiares para simulações de desempenho térmico. Fatores ambientais como temperatura do ar e velocidade do vento com a mudança de altitude e suas implicações ambientais no meio urbano trazem complicações com excesso de dados de entrada que muitas vezes são de difícil aquisição.

Em sua tese, Toledo (2006) avalia o desempenho da ventilação natural pela ação dos ventos em edifícios de apartamentos em Maceió trabalhando com modelos de edifícios de quatro apartamentos por andar. O autor desenvolveu um método de análise simplificado e qualitativo de avaliação da ventilação natural considerando o escoamento bidimensional laminar sem estimar valores de vazão ou velocidade do

ar. Considerando as peculiaridades dos apartamentos de planta “H”, as conclusões do autor demonstram o comportamento diferenciado da ventilação natural entre os apartamentos de diferentes orientações. O trabalho de Toledo (2006) estabelece a importância da avaliação de desempenho térmico em um edifício deste formato ventilado naturalmente.

São muitas as variáveis envolvidas na ventilação natural em uma avaliação quantitativa. Mesmo considerando todas, não seria possível relacioná-las ou simplificá-las a uma única variável. Além disso, estas variáveis não podem, na maioria dos casos, ser avaliadas facilmente com uma boa precisão. Os cálculos de ventilação natural são resolvidos geralmente por meio das ferramentas da simulação do fluxo de ar. Estas ferramentas são modelos computacionais de dinâmica dos fluidos (CFDs), modelos zonais, nodais ou empíricos que resolvem equações simplificadas para computar os fluxos de ar no edifício. Entretanto, estes programas tendem a propagar e aumentar as incertezas dos parâmetros da entrada, pois alguns destes parâmetros, como coeficientes da pressão, já são bastante incertos (GERMANO E ROULET, 2005).

Portanto, com este trabalho, buscar-se-á esclarecer alguns parâmetros de ventilação utilizados na determinação de taxas de ventilação e desempenho térmico de edificações. Foram apresentadas as formas de obtenção desses parâmetros, suas limitações e aplicações nos cálculos de ventilação. Para a avaliação foi empregada uma escala de classificação baseada nos números de graus hora de refrigeração obtidos com as temperaturas do ar externo, determinando o maior ou menor desempenho entre uma escala de “A” a “E”. Deste modo, dominando os parâmetros de entrada e adotando um método de classificação de desempenho térmico, foi avaliado um edifício multifamiliar naturalmente ventilado na cidade de Campo Grande, MS.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Avaliar a ventilação natural e o desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares na cidade de Campo Grande, MS.

1.2.2. Específicos

1. Esclarecer os conceitos sobre os parâmetros de ventilação natural adotados no modelo de rede, AirflowNetwork, do *EnergyPlus*.
2. Avaliar a influência dos parâmetros de ventilação adotados para simulações com o *EnergyPlus* no desempenho térmico de um edifício multifamiliar naturalmente ventilado.
3. Classificar o nível de desempenho térmico de um edifício multifamiliar real, naturalmente ventilado, e seus apartamentos.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo objetiva a apresentação dos principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Inicia-se com a definição dos principais meios de ventilação natural em edificações. Em segundo tópico apresenta as variáveis e parâmetros envolvidos na ventilação natural. E por fim, apresenta os métodos existentes de determinação de taxas de infiltração e ventilação.

2.1. Infiltração e Ventilação Natural

A renovação de ar no ambiente deve proporcionar conforto e qualidade do ar interno. Este fenômeno pode ser dividido em duas categorias: ventilação e infiltração. A ventilação ocorre quando o ar entra intencionalmente na edificação, pode ser natural ou forçada. A ventilação é o fluxo de ar que entra por aberturas planejadas como janelas e portas através de pressão natural ou artificial. Ventilação forçada é o movimento provocado intencionalmente no ar para dentro e para fora do edifício usando ventiladores e exaustores, também é chamada de ventilação mecânica. Infiltração é o fluxo de ar que vem do exterior para o interior da edificação através de frestas e outras aberturas não intencionais. Assim como a ventilação natural, a infiltração pode ser causada por diferença de pressão causada por meios naturais ou artificiais. A ventilação também pode ocorrer com o ar que vai de um ambiente interno para outro, sendo intencional ou não. Esses modos de trocas de ar afetam significativamente o consumo de energia, a qualidade do ar e o conforto térmico. E variam de acordo com as condições climáticas e a operação e uso da edificação. (ASHRAE, 2003)

Existem variados elementos que potencializam o aproveitamento da ventilação natural, desde as tradicionais torres de ventilação até modernas técnicas com captadores de vento. Existindo uma linha de pesquisa distinta, própria para estudos do desempenho destes tipos de sistemas (KHAN et al, 2008), porém, que neste trabalho não serão abordadas.

Edificações normalmente aproveitam a infiltração e ventilação natural proveniente de aberturas de portas e janelas para atender suas necessidades de ventilação. Apesar da dependência das condições climáticas para o uso dessas estratégias o domínio manual das janelas é mais adequado para os ocupantes manterem o controle da qualidade e temperatura do ar interno. (RAJA et al, 2001)

A movimentação de ar em uma edificação esta relacionada a diversas variáveis e sujeita às leis da física. Para que haja movimentação de ar no ambiente deve haver diferença de pressão e um caminho para que o ar se movimente. O caminho se faz entre as aberturas, e a diferença de pressão pode ocorrer por ação do vento ou pela diferença de densidade do ar que ocorre no efeito chaminé (BOWER, 1995; ALLARD, 1998; ASHRAE, 2003).

Os efeitos da ventilação natural estão relacionados a algumas estratégias bioclimáticas, como na ventilação cruzada e no efeito de massa térmica para ventilação noturna. Alguns pesquisadores dedicam seus estudos ao efeito destas estratégias, como Zhou et al (2008), que desenvolveram um modelo de balanço térmico que acopla os efeitos de massa térmica externa e interna, a taxa de ventilação natural e a temperatura de ar interna para edifícios naturalmente ventilados. Os autores discutem o efeito da massa térmica externa e interna na temperatura de ar interna conside-

rando seis tipos de paredes externas com configurações diferentes, estruturas de pouco peso e pesadas com e sem isolamento externo/interno

2.1.1. Efeito Chaminé

A pressão do efeito chaminé é a pressão hidrostática causada pela diferença entre as alturas da coluna de ar entre o interior e exterior da edificação. A pressão hidrostática depende da diferença da densidade do ar e da altura do ponto de estudo entre o ambiente interno e externo. (ALLARD, 1998). A diferença de pressão gerada por esse fenômeno, desconsiderando o gradiente vertical da densidade do ar, é dada pela Equação 2.1, apresentada pela ASHRAE (2003), para qualquer ponto vertical:

$$\Delta P_S = (\rho_{ext} - \rho_{int})g(H_{NPL} - H) = \rho_o \left(\frac{T_{ext} - T_{int}}{T_{int}} \right) g(H_{NPL} - H) \quad \text{Eq.2.1}$$

onde:

ΔOs é a diferença de pressão gerada pelo efeito chaminé

(Text - Tint) é a diferença de temperatura externa e interna, em Kelvin.

(pext - pint) é a diferença de densidade do ar externo e interno em kg/m³.

H_{NPL} é a altura do nível de pressão neutra em metros.

g é a constante de gravidade, 9,81 m/s².

Por convenção, a diferença de pressão pelo efeito chaminé é positiva quando a edificação está pressurizada em relação ao exterior, causando a exaustão do ar interno. Assim, desconsiderando outros efeitos, quando o ar interno de uma edificação está mais quente que o ar externo a edificação está sujeita a uma sub-pressão na base e uma pressão no topo. Ocorrendo o contrário quando o ar interno é mais frio que o externo.

2.1.2. Ação dos ventos

O vento causa variação de pressão nas superfícies das edificações e altera a entrada e saída de ar pelas aberturas, fazendo com que ocorra a ventilação natural e infiltração de ar. As formas das edificações podem gerar padrões de fluxo de ar muito complexos. Para determinar a influência das condições de fluxo de ar ao redor das edificações são necessários testes em túneis de vento, escoamento em fluxo de água em maquetes ou testes em modelos reais (ASHRAE, 2003).

Quando o vento atinge uma edificação, distribui pressões estáticas nas superfícies externas do edifício. Estas pressões dependem da direção e velocidade do vento, densidade do ar, orientação da superfície e características do entorno. Geralmente a pressão do vento é positiva a barlavento e negativa a sotavento. Porém essas pressões podem ser negativas ou positivas, dependendo da direção e forma da edificação.

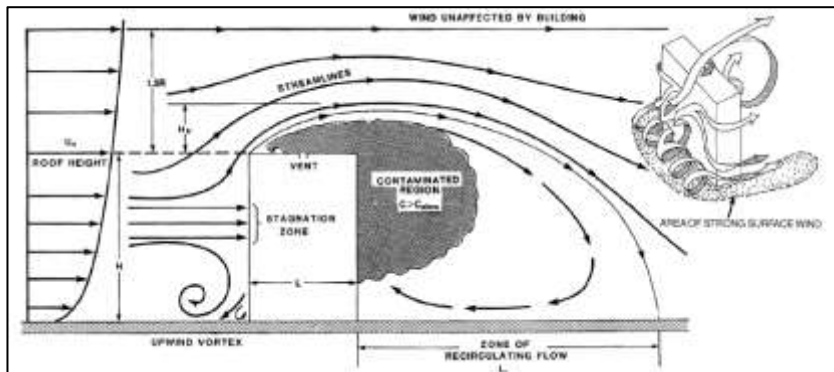


Figura 2.1. Comportamento do vento ao redor de um edifício retangular
Fonte: ASHRAE (2003)

O comportamento instável do vento, com suas turbulências e rajadas, causa variações de pressão muito instáveis sobre as superfícies que atingem. Por norma essas pressões são medidas por valores médios em períodos de 600s. A pressão instantânea do vento sobre uma superfície pode variar significativamente acima ou abaixo desses valores médios, e os valores de pico podem ser duas ou três vezes maiores que estes valores. Os valores de pico são indicados para o cálculo de carga estrutural, enquanto os valores médios são os valores indicados para os cálculos de infiltração e ventilação natural. Apesar das pressões sobre a superfície variar muito por causa da instabilidade do vento, a ASHRAE (2003) recomenda o uso de valores médios como suficientes para o cálculo de infiltração e ventilação.

A pressão média do vento sobre uma superfície é proporcional à pressão de velocidade de vento P_v , conforme a equação de Bernoulli¹:

$$P_v = \frac{\rho_{ar} \cdot U_H^2}{2} \quad \text{Eq.2.2}$$

Portanto, a diferença de pressão sobre a superfície de uma edificação (P_s) e a pressão atmosférica local na mesma altura e sob vento não turbilhonado é:

$$\begin{aligned} P_s &= C_p \cdot P_v \\ \therefore \\ P_v &= C_p \rho_{ar} \frac{U_H^2}{2} \end{aligned} \quad \text{Eq.2.3}$$

¹ Em dinâmica dos fluidos, a equação de Bernoulli, atribuída a Daniel Bernoulli (1700-1782), descreve o comportamento de um fluido que se move ao longo de um tubo.

Onde :

P_V é a pressão média do vento sobre a superfície

C_P é o coeficiente de pressão de vento local para a superfície da edificação.

ρ é a densidade do ar.

U_H é a velocidade média do vento na altura da superfície, pode ser estimada a partir da correção de uma velocidade de vento de referencia.

2.1.3. Efeito Combinado

A combinação do efeito chaminé e a ventilação por ação dos ventos pode funcionar muito bem, garantindo a renovação de ar e mantendo um ambiente confortável. Porém, no dimensionamento para o aproveitamento desses fenômenos é necessária atenção na inter-relação dos dois efeitos, pois apesar das análises e cálculos serem feitas usualmente separadas, um edifício geralmente estará sujeito à ação dos ventos e ao efeito chaminé simultaneamente. E estes dois efeitos podem agir de maneira a se anularem entre si, ou se complementando para uma melhor ventilação natural. A oposição do efeito dos ventos sobre o efeito chaminé pode provocar o refluxo do ar a ser retirado, impedindo a renovação de ar fresco no ambiente.

Segundo a ASHRAE (2003) as diferenças de pressão devido à ação dos ventos e efeito chaminé devem ser somadas para se calcular a taxa de ventilação. Para temperaturas internas uniformes, a diferença de pressão total pode ser descrita através dos parâmetros de pressão do vento (P_U) e parâmetros de pressão do efeito chaminé (P_T):

$$P_U = \rho_o \frac{U_H^2}{2}$$

$$P_T = g \cdot \rho_o \left(\frac{T_{ext} - T_{int}}{T_{int}} \right) \quad \text{Eq.2.4}$$

Onde:

T é a temperatura do ar em Kelvin.

Assim, a diferença de pressão em cada abertura é dada por:

$$\Delta P = s^2 \cdot C_P \cdot P_U + H \cdot P_T \quad \text{Eq.2.5}$$

Essa equação pode ser usada para qualquer abertura da edificação, desde que se obtenham os valores apropriados de Coeficientes de pressão (C_P), fator de obstrução (s) e altura (H). Porém quando as pressões internas não forem uniformes deverão ser feitas análises mais complexas.

2.2. Parâmetros de Ventilação Natural

2.2.1. Coeficientes de pressão

O coeficiente de pressão do vento (C_P) é um número adimensional que indica as relações entre as pressões em diferentes pontos das superfícies externas de um sólido. Cada ponto da edificação que sofre pressão do vento possui seus próprios valores de C_P para cada direção de vento. Os valores de C_P dependem da forma da edificação, da direção do vento e da influência de obstruções como edificações

vizinhas, vegetação e características locais do terreno. Devido a tantas variáveis, só é possível obter valores de C_p precisos com modelos de testes em túneis de vento, pois os C_p s não dependem do tamanho do corpo que recebe a pressão e sim das proporções entre as dimensões de suas faces.

A Figura 2.2 ilustra a distribuição de coeficientes de pressões de vento sobre a superfície de um edifício em diversas direções de incidência de vento. É possível observar como a distribuição das pressões varia para cada ponto da fachada e para cada direção de vento, sendo que para a mesma direção de vento, como nos casos à 45 e 60°, a fachada pode apresentar pressões positivas e negativas ao mesmo tempo.

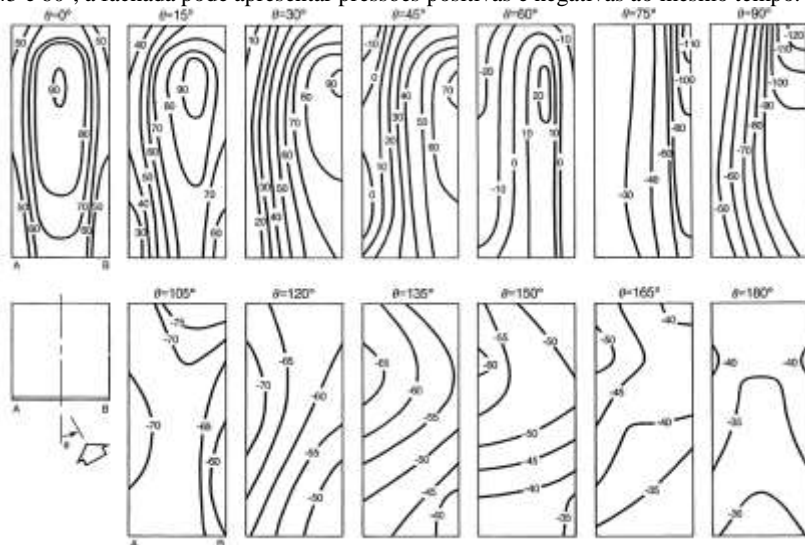


Figura 2.2. CPs para diferentes ângulos de ataque sobre uma fachada.

Fonte: DaVenport e Hui (1982) apud ASHRAE (2003)

Em uma edificação retangular, quando o vento sopra sobre uma fachada, o ar desacelera aproximando da superfície e provoca uma pressão, a pressão de vento máxima ocorre aproximadamente a 75% da altura da fachada a barlavento. O ar é desviado pela superfície da fachada e o fluxo de ar é separado pelas arestas da edificação causando sub-pressão nas porções das fachadas subjacentes próximas as arestas que desviaram o fluxo. A fachada posterior apresenta sub-pressão e a distribuição de pressão sobre o telhado depende de sua geometria (ALLEN, 1984). Veja Figuras 2.2 e 2.3.

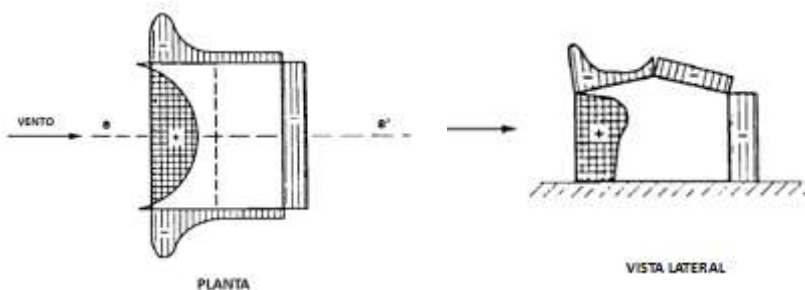


Figura 2.3. Exemplo de distribuição de pressão de vento sobre um sólido

Fonte: Allen (1984)

Segundo Walker(1992), o coeficiente de pressão sobre as superfícies externas de uma edificação é definido pela normalidade da diferença entre a pressão medida sobre a superfície (P_{sup}) e uma pressão de referência, normalmente a pressão atmosférica (P_{ref}), sobre a pressão exercida pela velocidade do vento adotada. Como descreve a Equação 2.6, abaixo:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho U^2 \quad \text{Eq.2.6}$$

Onde U é a velocidade do vento em um ambiente não turbilhonado considerando uma altura de referencia, que será descrita em seguida. Sendo o coeficiente de pressão definido como:

$$C_p = \frac{P_{sup} - P_{ref}}{P_{vent}} \quad \text{Eq.2.7}$$

Allen (1984) apresenta a relação entre o valor adimensional do C_p e as características dimensionáveis da edificação, que equivale a uma função relacionada a diversos fatores:

$$C_p = \frac{P - P_{(o)}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = f(L, H, WD, Re, St) \quad \text{Eq.2.8}$$

Onde:

P é a pressão no ponto onde o coeficiente deve ser calculado

$P_{(o)}$ é a pressão de referencia

ρ é a densidade do ar

v é a velocidade de referencia do ar

L é a proporção da dimensão horizontal

H é a proporção da dimensão vertical

WD é a direção do vento em relação ao eixo da edificação

Re é o número de Reynolds, coeficiente do tipo de escoamento do ar, turbulento ou laminar.

St é o número de Strouhal, coeficiente adimensional que descreve o mecanismo de fluxos oscilantes.

Os valores de coeficiente de pressão das fachadas e cobertura de uma edificação são de suma importância para que os cálculos de infiltração e ventilação natural sejam válidos (KNOLL et al, 1996). A precisão de experimentos em túneis de vento é comprovada, porém muitas vezes inviabilizada por razões técnicas e financeiras. Adotar valores estabelecidos ou estimar valores de C_p a partir da regressão de bases de dados de túnel de vento podem ser métodos práticos e baratos para aplicações comuns, porém com menos precisão e algumas limitações.

Na literatura encontram-se vários resultados de medições de pressão de vento feitas para edificações e condições específicas que não são muito aplicáveis em outras situações. Porém, existem medições que abrangem uma ampla variação dos parâmetros, feita para analisar seus efeitos na determinação de C_p de edificações (WALKER, 1992).

A maioria das edificações está em ambiente urbano e é obstruída por edificações vizinhas, árvores, arbustos e etc. Estas obstruções alteram o fluxo de ar que passa pela edificação, causando a redução da velocidade do vento e conseqüentemente a alteração de seus coeficientes de pressão.

Allen (1984) apresenta resultados de validação de C_p s e compara os resultados de túneis de vento, equações de definição de C_p s e medições em edificações existentes. Por mais que os valores de túneis de vento e medições reais apresentem grande precisão na determinação do C_p , suas aplicações não são muito acessíveis. Tornando viável e aceitável a aplicação de valores padrões e equações derivadas, que a partir de um ou mais grupos de dados de condições de pressão podem ser usadas na determinação de C_{ps} em diferentes condições.

Assim, para o cálculo de taxas de ventilação em edificações em ambientes comuns e de formato simples os C_{ps} podem ser razoavelmente estimados a partir de dados de túnel de vento existentes. Deste modo, existem vários métodos para determinação de coeficientes de pressão gerados a partir de bancos de dados de estudos paramétricos em túneis de vento. Como alguns exemplos temos Allen (1984) e Liddament (1986) que apresentam tabelas de C_p s indicadas para alguns formatos de edificações, Swami e Chandra (1979), Akins et al (1979) apud Ashrae (2003) e Sharag-Eldin (2007) que desenvolveram equações de regressão para estimativas de C_p s médios e Grosso (1992) e Knoll et al (1996) com aplicativos computacionais para determinação de C_p s.

Allen (1984) apresenta vários códigos de boas práticas contendo tabelas de coeficientes de pressão para diferentes formatos de edificações. A autora apresenta dados do código Britânico CP3, do código de edificações do Canadá, da norma americana ANSI e da Norma australiana. Apesar dos dados destes códigos terem sido obtidos a partir de estudos de pressão de vento para cargas estruturais, seus valores ajustados são considerados razoavelmente aplicáveis. Outra limitação destes códigos é que apresentam apenas os valores de pressão máxima da fachada, sendo que a distribuição de pressão na superfície não é uniforme. A Figura 2.4 é um exemplo de como Allen (1984) apresenta os valores de C_p s para uso em cálculos de ventilação.

3

Gable roof's $\alpha = 15^\circ$

The diagram shows a building with a gable roof. The roof pitch is indicated as $\alpha = 15^\circ$. The plan view shows a rectangular building with width b and height h . The wind direction is α . The plan view is divided into four sections: A (windward wall), B (leeward wall), C (windward roof slope), and D (leeward roof slope). The roof sections are labeled E, F, G, and H. The plan view also shows the internal pressure coefficient $C_{p,i}$ for different opening distributions.

External pressure coefficient $C_{p,e}$ for $h:b:l = 2.5:1:1$

β	A	B	C	D	E	F	G	H
0°	+0.9	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
15°	+0.8	-0.5	-0.9	-0.6	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7
45°	+0.5	-0.5	+0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5
45°	For section "m" $C_{p,e}^* = -1.0$; "n" $C_{p,e}^* = -0.8$							

Internal pressure coefficient $C_{p,i}$ for $\beta =$

	0°	15°	45°
Openings uniformly distributed	± 0.2	± 0.2	± 0.2
Openings on side A predominating	+0.8	+0.7	+0.4
Openings on side B predominating	-0.5	-0.5	-0.4
Openings on side C predominating	-0.6	-0.8	+0.4

$(C_p^* = \text{maximum local pressure})$

Figura 2.4. Exemplo de tabela de coeficientes de pressão de vento
Fonte: Allen (1984)

Swami e Chandra (1988) relacionaram o efeito da direção do vento sobre o coeficiente de pressão de uma superfície desobstruída de vários experimentos e estabeleceram uma relação matemática entre o coeficiente de pressão, a geometria de um bloco e a direção do vento. A regressão não linear realizada para encontrar a função de coeficientes de pressão médios das superfícies apresentou um coeficiente de correlação de 0.8, considerado bom para a grandeza da amostra, validando essa equação para ser usada na obtenção de coeficientes de pressão para cálculos de infiltração e ventilação natural em edificações. Entretanto, a equação de Swami e Chandra (1988) considera o efeito da direção do vento sobre a pressão das superfícies em ambientes desobstruídos.

O coeficiente de pressão sobre um ponto de uma edificação varia conforme a posição desse ponto na superfície, principalmente próximo às arestas. Uma simplificação desse valor é feita na equação de Swami e Chandra (1988) através do Coeficiente de Pressão médio da superfície. Segundo os autores, esse método de simplificação pode levar a um erro em torno de 10%, porém a variação de coeficiente de pressão em uma superfície pode ser muito maior.

Um programa de computador foi usado para obter a curva a partir do banco de dados de C_{ps} através de técnicas de regressão *stepwise*. O programa rodou com um grande número de possibilidades de parâmetros gerados a partir da combinação da direção do vento (α), proporção da geometria (S) e angulação da cobertura (γ e δ). Os valores que mais influenciaram o valor do C_p foram a direção do vento e a proporção da geometria, sendo o ângulo da cobertura considerado insignificante. A partir dos parâmetros significativos a equação final recomendada foi:

$$NC_p = Ln \left[C0 + C1. \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + C2. \sin^2(\alpha) + C3. \sin^3(2.\alpha. G) + C4. \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + C5. G^2. \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + C6. \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad \text{Eq.2.9}$$

Onde:

NC_p é o C_p normalizado.

\ln refere-se à logaritmo natural.

α é a direção do vento, em graus.

$G = \ln(S)$, logaritmo natural da proporção S .

S é a razão entre o comprimento da fachada considerada e o comprimento das fachadas adjacentes.

Os coeficientes da equação são:

$$\begin{array}{lll} C0 = 1,248 & C1 = -0,703 & C2 = -1,175 \\ C4 = 0,769 & C5 = 0,07 & C6 = 0,717 \end{array} \quad C3 = 0,131$$

O coeficiente de correlação da Equação 2.9 é de 0,797, considerado um bom valor para a diversidade de dados utilizada. Entretanto para normalizar os dados de C_p disponíveis o ângulo de incidência zero foi fixado com valor de C_p igual a 1,0. Assim, para ajustar esta adequação, é sugerido pelos autores que o valor de C_p para o ângulo de incidência zero seja ajustado adicionando a equação o multiplicador 0,60, que representa o valor médio de todos os C_p à esse ângulo de incidência. Esta equação, com o multiplicador 0,60, é a mesma utilizada pelo *EnergyPlus*, no calculo de C_p s para edifícios baixos.

Akins et al (1979) apud Ashrae (2003) formulou uma equação para determinação de coeficientes de pressão médio em edificações altas. As Equações de Swami e Chandra(1980) e Akins et al (1979) apud Ashrae (2003), são utilizadas pelo programa *EnergyPlus* na opção de seu calculo próprio de coeficientes de pressão superficial médio. A Equação 2.9, de Swami e Chandra, é usada no calculo de C_p s para edifícios baixos, cuja altura é menor que três vezes o menor lado de sua base e a equação de Akins, no calculo para edifícios altos, cuja altura é maior que três vezes o menor lado de sua base.

Sharag-Eldin(2007) desenvolveu um modelo matemático para determinação de coeficientes de pressão em edificações simples considerando as obstruções vizinhas. Um coeficiente de modificação de pressão foi definido para determinar o efeito de obstruções de blocos vizinhos. O método considera o efeito do mascaramento de blocos de obstrução e dos espaços entre eles sobre os coeficientes de pressão das superfícies de uma edificação. A Figura 2.5 apresenta um resultado de validação do método comparando os C_p s medidos em túnel de vento, C_p s calculado sem considerar obstruções vizinhas e C_p s calculados pelo método de Sharag-Eldin(2007).

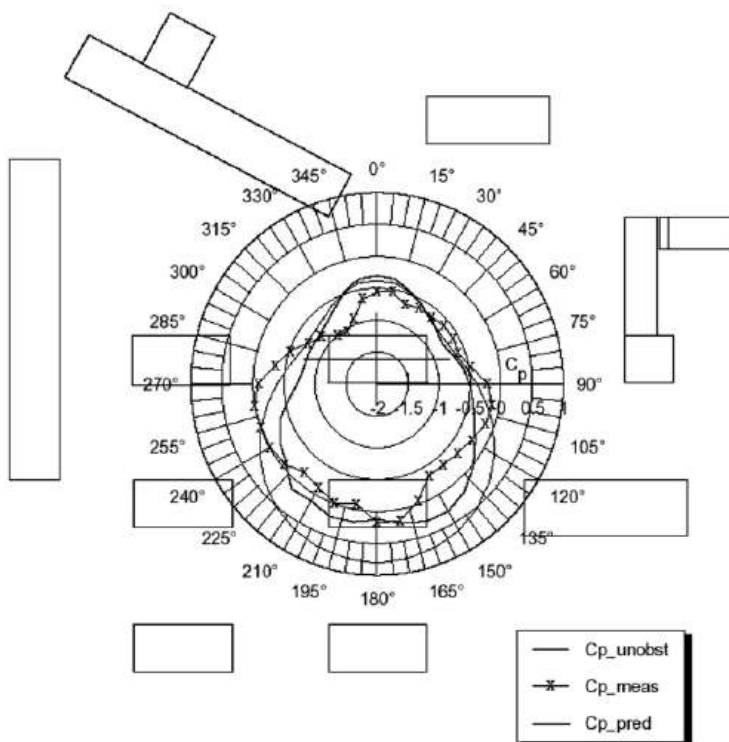


Figura 2.5. Validação do modelo matemático de Sharag-Eldin(2007).

Fonte: Sharag-Eldin(2007)

A Figura 2.5 apresenta a influência das obstruções locais nos CPs, chamando a atenção para as limitações destes valores quando adota-se métodos de obtenção de CP que não consideram as obstruções vizinhas, como os métodos apresentados anteriormente. Sendo motivo de preocupações principalmente no caso das equações de Swami e Chandra (1988) e Akins et al (1979) apud Ashrae (2003), que são utilizadas nos cálculos de CPs médios no programa *EnergyPlus*.

Porém, Moeske et al (2005), discutindo sobre a influência da distribuição de pressões de vento sobre o edifício, afirmam ser impraticável fazer observações quando se usa coeficientes de pressão médios para as fachadas das edificações, ou quando não se tem as informações da distribuição de pressões nas superfícies.

Buscando uma fonte melhor para obtenção de CPs em edificações, Knoll et al (1996) apresentam um programa chamado “TNO CP Generator” desenvolvido para determinar coeficientes de pressão de vento distribuídos em fachadas e coberturas de edificações de formato simples, considerando obstruções vizinhas e a rugosidade do terreno. O programa é baseado em ajustes de dados existentes de túnel de vento para as condições desejadas. No trabalho de Knoll et al (1996), o modelo avaliado teve seus valores de CP validados, onde os dados apresentaram boa corre-

lação, comparada com medições em modelos de edifícios reais.

O TNO CP Generator, de Knoll et al (1996) é um aplicativo online de fácil manuseio. Seu arquivo de entrada é carregado pela internet com um arquivo de texto contendo a descrição do modelo por coordenadas e orientações da edificação e seus obstáculos, bem como as coordenadas dos CP desejados como dados de saída. O cálculo é realizado somente para prismas retangulares e seus resultados retornam em formas de gráficos e tabelas prontos para serem inseridos em programas de cálculo de ventilação natural. A Figura 2.6 apresenta um exemplo de resultado do programa.

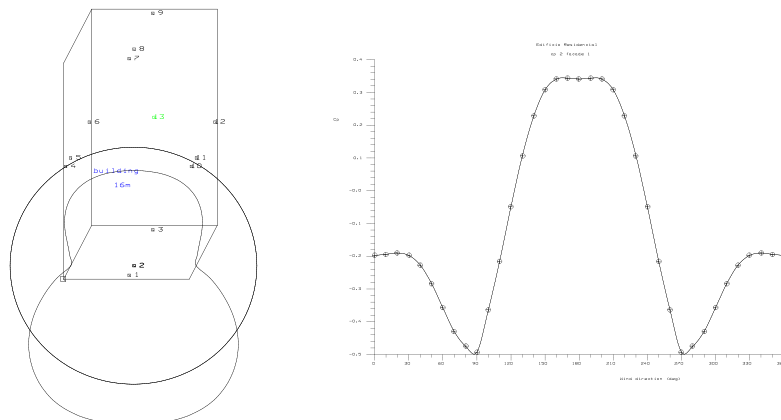


Figura 2.6. Exemplo de resultado obtido com o TNO CP Generator

Via internet também existem como fonte de CPs, bases de dados de estudos em túnel de vento disponíveis para estudos de ventilação. O departamento de arquitetura da faculdade de engenharia da Universidade Politécnica de Tóquio disponibiliza através de seu centro de informações de vento uma base de dados de coeficientes de pressão que abrange resultados de testes em túnel de vento para diversos formatos de edificações (Wind Pressure Database, 2008). Para cada modelo estão disponíveis os CPs para diversos pontos de todas as fachadas em direções de vento a cada 5°. Os dados estão disponíveis em imagens e planilhas de dados. A Figura 2.7 é um modelo exemplar de como os dados estão disponíveis em forma de imagem.

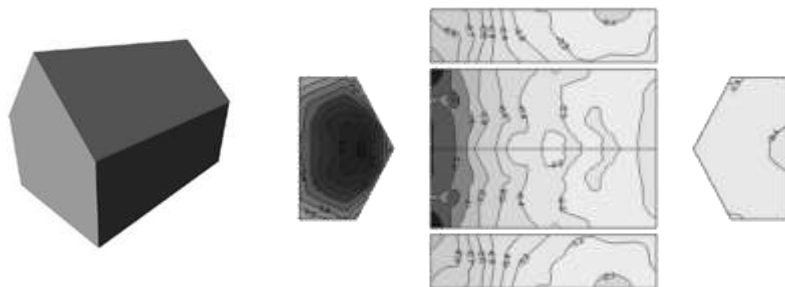


Figura 2.7. CPs a 0° sobre modelo da base de dados de Tóquio
Fonte: Wind Pressure Database, 2008

Também é possível modelar o fluxo de ar ao redor das edificações usando CFD. Segundo Good et al (2008), vários programas estão disponíveis comercial ou gratuitamente para resolver problemas de fluidodinâmica. Estes tipos de CFD podem ser usados como fontes preliminares de valores de C_p em diversas situações. Se estudos em túneis de vento não forem acessíveis, porém indicados para um determinado projeto, estimativas podem ser feitas por especialistas. Estas estimativas podem ser feitas a partir de estudos com CFD, porém assumindo suas limitações. Nas conclusões de Good et al (2008), resultados de comparações de estudos em túneis de vento com estudos de CFD são apresentados. Os resultados de CP calculados por CFD apresentam uma diferença média de 28% com ventos à 90° e diferença média de 46% com ventos à 270°, comparados com resultados CPs obtidos em túnel de vento.

Outros meios de estimativa de valores de CP continuam sendo criados, como o trabalho de Kalogirou et al (2003), que investigou a utilização de redes neurais artificiais para a predição dos coeficientes de pressão do ar em toda a abertura de um edifício naturalmente ventilados. Entretanto, os métodos para estimativas de CPs, geralmente, só apresentam valores razoáveis de CP para formas prismáticas retas, porém, para edificações com formas mais complexas e com necessidades de maior precisão, somente estudos em túnel de vento são recomendados.

2.3. Coeficiente de descarga

As correntes de ar dentro do espaço arquitetônico vão perdendo sua força de pressão conforme as resistências que encontram em seu caminho. Estas perdas podem ser causadas por fricção, mudança de direção, expansão e contração da seção da corrente e perdas por resistências na entrada e saída do ar nos ambientes. A essas duas últimas, que caracterizam as resistências de fluxo de ar encontradas nas aberturas de portas e janelas, atribui-se um coeficiente de descarga.

O coeficiente de descarga (C_d) é uma função entre a diferença de temperatura do ar, a velocidade do vento e, principalmente, a geometria da abertura (ALLARD, 1998). Segundo Limb (1992), no glossário de infiltração e ventilação da AIVC, C_d é um coeficiente adimensional relacionado com a taxa de fluxo de ar média que passa pelas aberturas e corresponde à diferença de pressão através delas.

Para aberturas pequenas internas, um valor representativo de C_d é 0,65. Para grandes aberturas internas o valor pode ser próximo de 1,0. Sendo um valor médio para uma abertura padrão adotado como 0,78 (ALLARD, 1998). Porém para Aynsley (1999) o C_d de janelas e portas retangulares pode ser adotado, geralmente, como 0,6. E Flourentzou et al (1998) considera para as aberturas desimpedidas, geralmente, um C_d entre 0,5 e 0,7.

Além destes valores médios pré estabelecidos como suficientes para cálculos de ventilação natural também existem tabelas de coeficientes de descargas com valores relacionados a cada tipo de abertura, transmitindo mais segurança na adoção de um C_d . Um exemplo de tabela de C_d s é encontrado em Clezar e Nogueira (1999), apresentado na Tabela 2.1, abaixo:

Tabela 2.1. Exemplos de Cd por tipo de janela

Tipo de janela	Cd
Veneziana com 50% de área livre	0,40
Basculante com chapas a 60 graus	0,58
Abertura com bordas vivas	0,62
Abertura com bordas arredondadas	0,85

Fonte: Clezar e Nogueira (1999)

Entretanto, muitas vezes, estes valores são impróprios para reproduzir os efeitos de venezianas e esquadrias muito permeáveis, geralmente utilizadas em clima tropical quente e úmido (MAGHRABI E SHARPLES, 1999). Existem alguns estudos contendo métodos para estimar valores de coeficientes de descarga para janelas e portas, porém não se vê metodologias desenvolvidas para calcular Cds para grandes aberturas equipadas com dispositivos de proteção solar e venezianas. E, além disso, os Cds de uma abertura pode variar de acordo com características do fluxo de ar, do número de Reynolds, da direção do vento e da forma e posição da abertura numa superfície. (KARAVA et al apud LIPING E HIEN, 2008). Entretanto, segundo Kurabuchi et al (2005), nenhum modelo apresentado até agora esclareceu adequadamente como o coeficiente de descarga se altera.

Em sua pesquisa, Kurabuchi et al (2005), propuseram um modelo tentando esclarecer como o coeficiente de descarga varia de acordo com as pressões totais nas aberturas e nos ambientes. Suas conclusões apontam para o início do entendimento do fenômeno, porém ainda sem nenhuma influência nos valores de aplicação prática dos Cd.

2.4. Coeficiente e Expoente de fluxo de massa de ar pelas frestas

A equação usada para determinar a taxa de fluxo de ar provocada por infiltrações através de frestas pode ser aplicada em fluxo laminar ou turbulento. Para ser usada na determinação de infiltração de ar através de frestas ela é representada por uma equação exponencial, Equação 2.10, a seguir:

$$Q = k. (\Delta P^n) \quad \text{Eq. 2.10}$$

Onde:

Q - vazão (m³/s)

k - coeficiente de fluxo relativo ao tamanho da abertura (m³/s a 1Pa)

ΔP - variação de pressão através da fresta

n - expoente de fluxo (0,5 se turbulento e 1,0 se laminar)

Valores de coeficiente k e expoente de fluxo n para diferentes tipos de frestas em esquadrias ou fechamentos são indicados por diversos autores, porém somente Liddament (1986) apresenta uma base de dados significativa. O expoente “n” depende das características do fluxo de ar e varia entre 0,5 a 1,0. Segundo Allard (1998), 0,5 equivale a um fluxo turbulento, enquanto 1,0 corresponde a um fluxo laminar, sendo recomendado um valor médio de 0,67 para frestas que ficam ao redor de janelas fechadas. Entretanto, em ASHRAE (2003) as frestas com grande resistência ao fluxo de ar, estreita ou muito compridas, tendem a ter um expoente próximo a 1. Para aberturas nas fachadas dos edifícios, o valor de “n” depende da geometria da

abertura, bem como dos efeitos de entrada e saída, valores médios para diferentes tipos de frestas é apresentado por Liddament (1986) pela Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Expoente de fluxo de massa de ar.

Tipo de abertura	n
Aberturas grantes	0.50
Frestas - cracks (portas e janelas)	0.66
Materiais porosos com juntas	0.75
Materiais porosos	1.00

Fonte: Liddament (1986)

Porém, segundo Santamouris (2002), para condições normais de pressão, não é necessária muita precisão para o expoente de fluxo de ar (n). Para a maioria dos casos é suficiente o uso de um expoente médio proveniente de várias fontes de dados, definido em aproximadamente 0.65.

Estas duas variáveis, k e n, são solicitadas em simulações no programa *EnergyPlus* como detalhamento de aberturas quando fechadas. Caracterizando o coeficiente e o expoente de fluxo de massa para frestas formadas nas quatro arestas das janelas. O valor padrão indicado pelo *EnergyPlus* para o k é de 0,001kg/s.m e um valor adimensional de 0,6 para n. Entretanto Liddament (1986) apresenta a maior fonte de coeficientes e expoentes de fluxo de ar disponíveis, apresentada na Tabela 2.3. Os valores originais da tabela estão em coeficientes de fluxo de volume por segundo por metro de fresta (dm³/s.m) sobre 1Pa, porém, como o *EnergyPlus* trabalha com o valor deste coeficiente em fluxo de massa de ar, estes valores foram convertidos para fluxo de massa de ar por segundo por metro de fresta (kg/s.m). As Tabelas 2.3 e 2.4 apresentam os expoentes e coeficientes de Liddament (1986) com os valores originais e convertidos.

Tabela 2.3. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de janelas

Tipo de Janela	Vedação	material	Expoente de fluxo de ar (n)			Coeficiente de fluxo (convertido em kg/s.m)		
			Max	Med	Min	Max.	Med.	Min.
Pivotante – eixo vertical lateral	com vedação	Madeira		0.66		0.00013	0.00004	0.00001
		Rev.Madeira		0.66				
		Metal		0.66		0.00037	0.00035	0.00018
	sem vedação	Madeira	0.85	0.66	0.5	0.00154	0.00030	0.00005
Pivotante-eixo horizontal superior	com vedação	Madeira	0.69	0.57	0.5	0.00158	0.00054	0.00014
		Metal	0.64	0.6	0.52	0.00071	0.00041	0.00023
	sem vedação	Madeira	0.61	0.56	0.6	0.00178	0.00140	0.00114
Pivotante – eixo vertical central	com vedação	Madeira		0.78			0.00004	
		Metal	0.7	0.66	0.63	0.00016	0.00009	0.00003
Pivotante – eixo horizontal central	com vedação	Madeira		0.57			0.00003	
	sem vedação	Madeira	0.9	0.6	0.53	0.00162	0.00103	0.00005
1 folha - Deslizamento horizontal	com vedação	Madeira		0.66			0.00006	
		Rev.Madeira		0.66			0.00008	
		Metal		0.66		0.00023	0.00010	0.00006
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00017	
2 folha - Deslizamento horizontal	com vedação	Madeira		0.66			0.00008	
		Metal		0.66		0.00017	0.00010	0.00005
		Plástico		0.66			0.00010	
	sem vedação	Madeira		0.66		0.00040	0.00025	0.00010
		Metal		0.63		0.00056	0.00028	0.00016
1 folha - Deslizamento vertical	com vedação	Metal		0.66			0.00012	
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00021	
2 folhas - Deslizamento vertical	com vedação	Madeira		0.66				
		Rev.Madeira		0.66				
		Metal	0.79	0.66	0.56	0.00036	0.00023	0.00005
	sem vedação	Madeira		0.66			0.00022	
		Metal	0.69	0.58	0.45	0.00155	0.00058	0.00026
Clarabóia	sem vedação	Metal	0.59	0.55	0.5	0.00397	0.00023	0.00021

Fonte: Adaptado de Liddament(1986)

Tabela 2.4. Coeficientes e expoentes de fluxo de ar por fresta de portas

Material	Tipo de Porta	Vedação	Local	Expoente de fluxo de ar (n)			Coeficiente de fluxo (convertido em kg/s.m)		
				Max	Med	Min	Max.	Med.	Min.
Porta de madeira	1 folha Pivotante	com vedação	Interna	0.7	0.6	0.5	0.00332	0.00187	0.00105
			Externa		0.64		0.00160	0.00124	0.00090
		sem vedação	Interna	0.79	0.59	0.51	0.00437	0.00204	0.00063
			Externa	0.71	0.59	0.5	0.00455	0.00171	0.00102
			Corta-fogo		0.58			0.00221	
	2 folhas Pivotantes	sem vedação	Interna		0.66			0.00539	
			Externa		0.6			0.00252	
Porta de Metal	1 folha de correr	sem vedação	Externa		0.66			0.00026	
	1 folha Pivotante	sem vedação	Interna		0.66			0.00005	
			Externa		0.66			0.00005	
Porta de enrolar	Por m² de porta		Externa		0.66			0.01810	

Fonte: Adaptado de Liddament(1986)

2.4.1. **Rugosidade do entorno**

A velocidade e direção do vento em estudos de ventilação natural normalmente são adquiridas em arquivos climáticos. Porém os dados disponíveis nestes arquivos foram medidos em cenários que, na maioria das vezes, são muito diferentes do cenário onde o edifício estudado encontra-se inserido e devem ser corrigidos para aplicação prática.

Os dados disponíveis de velocidade de vento mais comuns são de estações meteorológicas instaladas próximas a aeroportos. Entretanto a diferença do entorno da estação e da edificação deve ser levada em conta. Para os dados de estações meteorológicas poderem ser usados em cálculos de infiltração e ventilação, as velocidades de vento devem ser corrigidas em relação à diferença de rugosidade do entorno da estação meteorológica e da edificação. Também deve ser corrigida a altura do anemômetro da estação a partir do solo, normalmente 10m, para a altura do ponto da edificação a ser estudada (ASHRAE, 2003). A velocidade média do vento (UH) para a altura da superfície do edifício (H), considerando a rugosidade do entorno local (δ), pode ser calculado a partir da velocidade de referência (Umet) através da Equação 2.11.

$$U_H = U_{met} \cdot \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}}\right)^{\alpha_{met}} \cdot \left(\frac{H}{\delta}\right)^{\alpha}$$

Eq.2.11

Onde:
δ é a espessura da camada limite do vento ²
α é o expoente para o terreno local da edificação

² Quando uma corrente de ar livre choca-se contra obstáculos, a aerodinâmica que governa o escoamento, faz com que este separe-se do corpo de escoamento, gerando uma camada limite. A altura da camada limite depende da geometria dos obstáculos.

δ_{met} é a espessura da camada limite do vento na estação meteorológica
 α_{met} é o expoente para o terreno local na estação meteorológica

Este é um método matemático simplificado para obtenção da velocidade média do vento o calculo da pressão de vento sobre uma edificação. É o método adotado no calculo do *EnergyPlus*

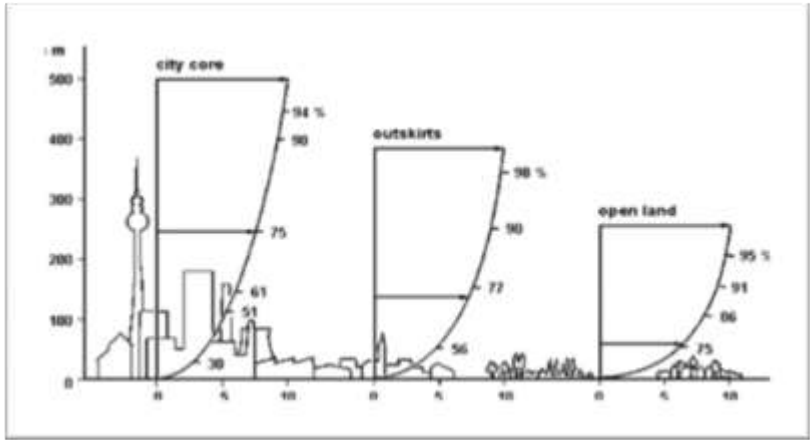


Figura 2.8. Perfil de rugosidade de diferentes entornos urbanos

Tabela 2.5. Perfil de rugosidade de diferentes entornos.

Tipo de Terreno	Descrição	Perfil de obstrução <i>EnergyPlus</i>	Expoente α ASHRAE	Camada limite δ , m
1	Centro de cidade grande, com pelo menos 50% das edificações maiores que 21m à distância de 2km ou 10 vezes a altura do edifício.	0.33	0.33	460
2	Área urbana ou suburbana, arborizada ou terreno com várias obstruções. À distância de 2km ou 10 vezes maior que a altura do edifício.	0.22	0.22	370
3	Terreno aberto com obstruções escassas menores que 10m, arredor típico de estação meteorológica.	0.14	0.14	270
4	Área desobstruída plana exposta ao vento. Entorno de corpos d’água de mais de 1.6km. À distância de 2km ou 10 vezes a altura da estrutura.	-	0.10	210

Fonte: Adaptado de *EnergyPlus* (2007) e ASHRAE (2003)

Normalmente as estações meteorológicas estão situadas em terreno aberto sem obstruções, equivalente aos valores da categoria 3 da Tabela 2.5. A Equação 2.11 estima a velocidade de vento local U_H em uma superfície solicitada através do

perfil do terreno de entorno e uma correção de altura da velocidade de vento horária U_{met} medida em uma estação meteorológica.

2.5. Métodos de determinação de Taxas de infiltração e ventilação

Existem diferentes técnicas para estimar as taxas de ventilação e infiltração através de edificações. Liddament (1986) divide as técnicas de cálculo de infiltração e ventilação em métodos empíricos e teóricos. Os modelos empíricos normalmente dependem de dados de medições de pressão ou de taxas de ventilação. E os métodos teóricos são os modelos matemáticos de redes e métodos simplificados. São três tipos de modelos para determinação de taxas de infiltração e ventilação em edificações que são adotados em simulações computacionais: modelos de redes, zonais e modelos de fluidodinâmica computacional (CFD) (ALLARD E SANTAMOURIS, 1998).

Também existem outros métodos para simulação de ventilação, como o método de Jensen et al (2007) que integraram um sistema utilizado em simulações de rede de água em simulações de edificações no programa BSim.

2.5.1. Modelos de Rede

Segundo Allard (1998) o conceito de modelos de rede considera a edificação como uma trama, onde cada zona da edificação pode ser representada por um nó e o ambiente externo é representado por nós em cada fachada. As interações entre as zonas são representadas por conexões de fluxo ar como janelas, frestas e portas. As interações com o ambiente externo são feitas a partir de conexões de fluxo de ar com os nós do ambiente externo. Para todos os nós, zonais e externos, são atribuídos valores de pressão. A Figura 2.9 representa uma rede de fluxo de ar em uma edificação.

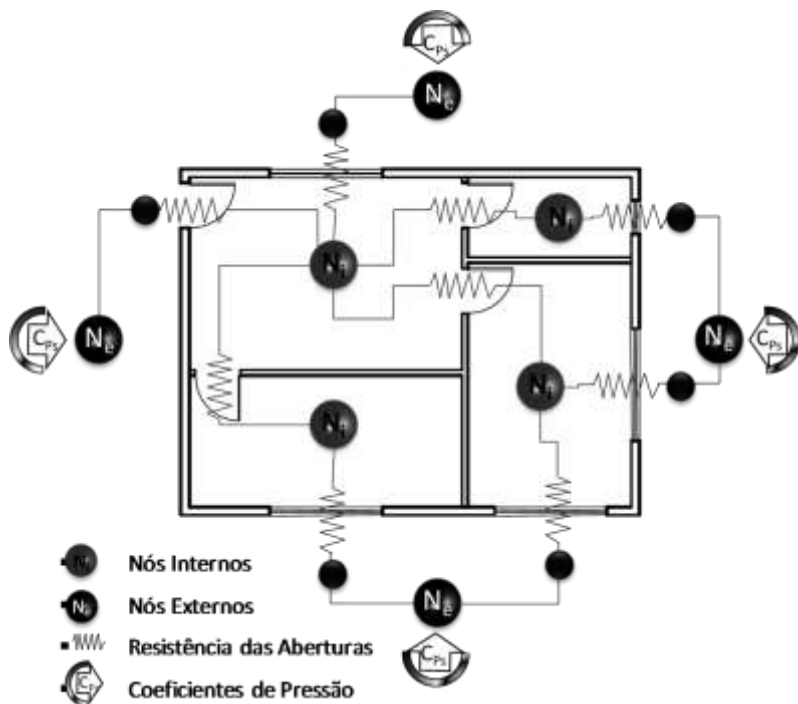


Figura 2.9. Planta esquemática de um edifício com sua rede de fluxo de ar

Allard (2008) explica que o fluxo de ar através das aberturas de uma edificação é diretamente relacionado com a diferença de pressão sobre as aberturas. Os nós internos, que representam os ambientes, são conectados entre si e com os nós externos. Somente as pressões de vento nos nós externos são conhecidas, porém com o modelo de rede ligando todos os nós é possível determinar a pressão dos nós internos aplicando equações de balanço de massa em cada nó. Assim, com os valores de pressão em cada abertura é possível determinar o fluxo de ar pela edificação. O balanço de massa para a zona i com a abertura j é dada pela Equação 2.12.

$$\sum_{k=1}^j \rho_i \cdot Q_{ik} = 0 \quad \text{Eq.2.12}$$

Onde Q_{ik} é o fluxo volumétrico da zona i para a zona k (m^3/s) e ρ_i é a densidade do ar que segue o fluxo (kg/s).

A aplicação do balanço de massa em cada nó interno da rede leva a uma série de equações não lineares simultâneas, cuja solução é a pressão do nó interno. Entretanto, aplicando a equação para cada nó, o sistema não linear de n equações é formado. A solução desse sistema é baseada no método de interação de Newton-Raphson. A base desse método é atribuir uma pressão inicial para os nós, e para

minimizar o valor residual deixado pela aplicação desse sistema, a cada nova interação uma nova pressão é estimada para cada nó. Esse método se torna muito complexo, dependendo da quantidade de interações necessárias.

Considerando um nó interno n interagindo com um nó externo m , o fluxo Q_{nm} é uma função da diferença de pressão entre os dois nós através da abertura, ΔP_{nm} , podendo ser positiva ou negativa conforme o sinal de ΔP_{nm} :

$$\Delta P_{nm} = P_n - P_m \quad \text{Eq.2.13}$$

Se $\Delta P_{nm} > 0$ e $\rho_{nm} = \rho_n$, então $Q_{nm} > 0$, e o fluxo de ar é do nó n para o nó m . E se $\Delta P_{nm} < 0$ e $\rho_{nm} = \rho_n$, então $Q_{nm} < 0$ e o fluxo de ar é do nó m para o nó n .

2.5.2. Modelos CFD

Projetos de edifícios naturalmente ventilados são auxiliados freqüentemente por meio de técnicas computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD), cuja aplicação está ganhando cada vez mais popularidade. Esta técnica permite determinar a distribuição da velocidade e pressão do vento interna e externa de um edifício, assim como as taxas de ventilação. Alguns estudos validam boa aceitação com modelos de CFD em estudos de infiltração e ventilação.

Evola e Popov (2006) analisaram dois modelos diferentes de CFD aplicados a um ambiente cúbico com diferentes configurações de ventilação. Os resultados numéricos foram comparados com dados experimentais, mostrando uma boa correlação. De acordo com seus resultados, o modelo de CFD pode ser considerado uma ferramenta útil para o estudo da ventilação natural por ação dos ventos, especialmente para a avaliação da taxa de ventilação e da distribuição de ar dentro de um ambiente. E para Good et al (2008) estudos com CFD são indispensáveis em análises detalhadas de performances de fluxos de ar interno, principalmente para elementos como torres de vento e chaminés.

Stavrakakis et al (2008) em seu estudo, examinaram a ventilação cruzada natural com aberturas em posições não simétricas, comparando um modelo real com modelo computacional analisado por CFD. O estudo em modelo real consistiu em medições da temperatura e velocidade do ar durante o meio-dia e tarde de dias típicos do verão. A parte computacional do estudo consistiu na aplicação de três modelos de CFD. Stavrakakis et al (2008) concluíram que todos os modelos de CFD aplicados concordam relativamente bem com as medidas em modelo real.

2.5.3. Modelo AirflowNetwork do EnergyPlus

O modelo Airflow Network do *EnergyPlus*, apresentado por Gu (2007), permite simular fluxos de ar causado pela ação dos ventos em múltiplas zonas através de um modelo de rede. O modelo calcula a pressão em cada nó e o fluxo de ar em cada componente de acordo com a pressão do vento e as relações entre cada elemento de abertura de forma dinâmica em simulações horárias. Através das taxas de ventilação são calculados os valores de temperatura do ar e umidade relativa.

Segundo Gu (2007), diversos modelos de rede vêm sendo desenvolvidos. No fim da década de oitenta foi desenvolvido o programa AIRNET, pelo *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, que além de calcular o fluxo de ar

através dos elementos de ventilação também considerava o fluxo de duas vias em grandes aberturas verticais. Da mesma forma, no começo dos anos noventa, um grupo de pesquisadores liderados pelo Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) desenvolveu o programa COMIS, com a inovação de considerar a influência da diferença de temperatura do ar nas trocas de ar. Ambos os programas, AIRNET e COMIS, determinam o fluxo de ar considerando a influência da temperatura em cada nó, entretanto não calculam a carga térmica devida à ventilação. Assim, para determinar as cargas e o funcionamento do sistema se fez necessário o uso em conjunto com um programa de simulação energética. Conseqüentemente, na década de noventa vários programas integraram os modelos de rede a modelos energéticos. Foi desenvolvido um modelo de rede próprio a ser integrado ao ESP-r, o AIRNET foi integrado ao FSEC3.0 e o COMIS foi parcialmente integrado ao DOE2.

Devido à importância das várias interações energéticas em edifícios ventilados, as versões antigas do *EnergyPlus* eram conectadas externamente ao programa COMIS. O acoplamento era principalmente para calcular o fluxo de ar pela edificação através da ação dos ventos usando o COMIS e integrando estas informações nos ganhos térmicos de cada zonas no *EnergyPlus* (HUANG ET AL APUD GU, 2007). Em seguida o modulo Air Distribution System (ADS) foi inserido ao *EnergyPlus*, esse modelo usava equações provenientes do AIRNET para simular sistemas de distribuição de ar e calcular as perdas de carga térmica devido a ventilação. Assim, o *EnergyPlus* possuía dois módulos de ventilação, o COMIS e o ADS. Para melhor integração e racionalização dos cálculos de ventilação no *EnergyPlus* em 2007 foi criado o modulo AirflowNetwork, substituindo as antigas ligações dos modelos COMIS e ADS.

Porém este módulo do *EnergyPlus* ainda carece de validações. Gu (2007) buscou validar o modelo através de dados medidos nos edifícios do Laboratório Nacional de Oak Ridge e no Centro de energia solar da Flórida. Porém esta validação foi realizada através do consumo de energia medido comparado com resultados simulados pelo *EnergyPlus* e entende-se que um modelo de ventilação deveria ser validado em termos de dados de ventilação como trocas de ar no ambiente ou, no mínimo, através da temperatura interna.

2.5.4. Métodos combinados

Os dois métodos mais usados em simulações computacionais, modelo de rede e CFDs, apresentam limitações próprias do método. Com modelos de rede não é possível descrever a distribuição dos fluxos de ar no ambiente, porém com ele facilmente pode-se fazer simulações dinâmicas, calculando as taxas de fluxo de ar para todas as horas do ano. Com CFDs é possível descrever os fluxos de ar dentro e fora das edificações, porém são simulações para uma condição estática. Em trabalhos recentes, alguns autores abordam este acoplamento de forma bem específica (Tan e Glicksman, (2005); Wang e Chen, (2007); Good et al, 2008; Liping e Hien, 2008)

Tan e Glicksman (2005) combinaram os programas PHOENICS com MultiVent. Wang e Chen (2007) combinaram o CONTAM com CFD0. Good et al (2008) consideram o CFD como solução para diversas limitações dos modelos de rede. Zhai et al (2002) também defendem a integração destes dois sistemas para eliminar suas limitações, uma vez que as informações prestadas pelas simulações

energéticas e CFD são complementares. Zhai et al (2002) apresentam algumas estratégias de integração dos programas *EnergyPlus* e MIT-CFD, demonstrando uma eficiente integração entre sistemas de simulação energética com CFD.

2.6. Considerações finais do capítulo

O conhecimento adquirido nesta revisão subsidiou o desenvolvimento dos procedimentos metodológicos apresentados no próximo capítulo. E o domínio dos métodos, conceitos e definições a respeito de ventilação natural foram a base para as discussões dos resultados e conclusões.

Os diferentes métodos de determinação de taxas de infiltração e ventilação natural apresentam limitações e imprecisões devidas à necessidade de simplificar um fenômeno tão complexo que é a ventilação. As incertezas são ainda maiores por se adotar parâmetros de ventilação que também simplificam o fenômeno natural. Entretanto, no atual estágio de desenvolvimento dos estudos de ventilação natural em edificações, estes métodos e parâmetros permitem avaliar através de simulações computacionais dinâmicas valores referenciais para determinação de desempenho térmico de um edifício.

3.PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em simulações de ventilação natural a adoção de valores adequados de coeficientes de pressão, coeficientes e expoentes de descarga de aberturas e frestas e o perfil de rugosidade do terreno é determinante para obtenção de resultados válidos. No *EnergyPlus*, é possível fazer simulações com estes parâmetros definidos por valores padrão, recomendados pelo programa, assumindo certas simplificações. Porém também é possível adotar parâmetros de ventilação obtidos em fontes externas, podendo adquirir maior precisão.

No caso específico de edifícios verticais, as fontes de dados podem variar em relação ao método de determinação do coeficiente de pressão em várias alturas das superfícies da edificação. Entretanto os valores destes parâmetros de ventilação são geralmente produzidos por métodos empíricos ou gerados para características climáticas específicas. Assim, os valores apresentados por diversas fontes podem ser muito diferentes, dependendo do método adotado ou da interpretação dos dados pelo usuário do programa de simulação. Logo, para obtenção de resultados consistentes de simulação de ventilação natural deve-se conhecer a influência da variação destes valores nos resultados de simulações de taxas de ventilação, temperatura do ar e graus-hora de refrigeração ou aquecimento.

A metodologia deste trabalho foi dividida em duas etapas distintas: análise de influência dos parâmetros de ventilação e análise de desempenho de modelos de edifícios existentes.

Na primeira etapa, que consiste em analisar a variação dos parâmetros de ventilação utilizados no *EnergyPlus*, foi definido um modelo experimental simplificado com o qual foram feitas simulações com os parâmetros de ventilação estudados. Com os resultados destas simulações será analisada a influência de cada parâmetro de ventilação nos resultados de taxas de ventilação e graus hora de refrigeração e aquecimento. Esta análise subsidiará a seleção dos parâmetros a serem usados nas simulações de análise de desempenho térmico em modelos de edifícios existentes.

Em seguida, com os parâmetros de ventilação estudados, foram realizadas avaliações de ventilação e desempenho térmico de modelos de edificações existentes para discutir a aplicação das simulações em situações reais. Os resultados destas simulações serão utilizados na avaliação da ventilação natural e seu efeito no desempenho térmico destes edifícios. Dois modelos de edifício foram estudados, um de quatro e outro de dois apartamentos por andar, ambos com 48 apartamentos. As duas tipologias adotadas permitiram analisar a influência do tipo de ventilação cruzada (lateral e transversal) e da altura do edifício (12 e 24 pavimentos) no desempenho térmico de edifícios verticais na cidade de Campo Grande, MS.

3.1. O programa EnergyPlus

Para esta investigação foi adotado o programa *EnergyPlus*, que simula de forma dinâmica o desempenho térmico e energético de edificações. O programa foi desenvolvido sob coordenação do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Foi elaborado a partir da integração de outros programas de simulação BLAST e DOE-2. O *EnergyPlus* pode emitir diversos relatórios sobre as mais diferentes variáveis envolvidas no desempenho termo-energético das edificações simu-

ladas, incluindo temperatura interna, temperatura operativa e taxas de infiltração e ventilação de cada zona térmica, utilizados neste trabalho.

3.2. Clima de Campo Grande

De acordo com a NBR-15220, o Brasil é dividido em oito diferentes zonas bioclimáticas. Campo Grande encontra-se na zona bioclimática 6, onde o verão é quente e chuvoso e o inverno é quente e seco. Para esta zona a norma indica como estratégia passiva de condicionamento a Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa), o resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento.

Segundo a classificação de Koppen, encontrada no Perfil Socioeconômico de Campo Grande (2008), a cidade situa-se na faixa de transição entre o clima mesotérmico úmido sem estiagem, onde a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C, com o mês mais seco com aproximadamente 30 mm de chuvas mensais, e o clima tropical úmido, com chuvas no verão e seca no inverno. Cerca de 75% das chuvas ocorrem entre os meses de outubro e abril, quando a temperatura média oscila em torno de 24°C. Os ventos predominantes são na direção leste, superior a 36%, existindo também uma frequência bastante significativa na direção norte (17%) e nordeste (17%).

Segundo análise da carta bioclimática de Campo Grande feita por Versage (2005), a condição de conforto térmico ocorre em aproximadamente 50% das horas na maioria dos meses do ano. Nos meses de dezembro a março, quando as condições térmicas de conforto são menores, a ventilação natural é a estratégia mais indicada como resfriamento passivo. A figura 3.1 apresenta as temperaturas de bulbo seco do arquivo climático de Campo Grande disponibilizado pelo *U.S. Department of Energy* (2009) para simulações através do programa *EnergyPlus*. Estes dados são originalmente desenvolvidos pelo projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA).

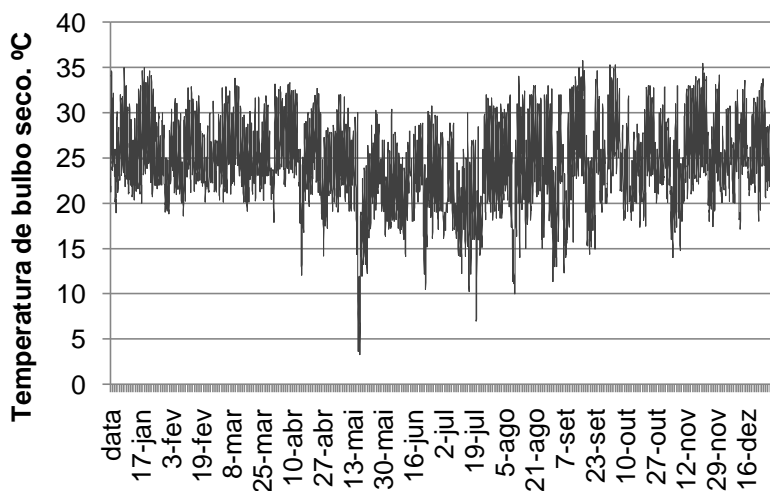


Figura 3.1. Temperaturas de bulbo seco do arquivo climático de Campo Grande.

A figura 3.2 apresenta a frequência, direção e velocidade dos ventos predominantes registrados em Campo Grande, segundo dados do mesmo arquivo climático do Figura 3.1.

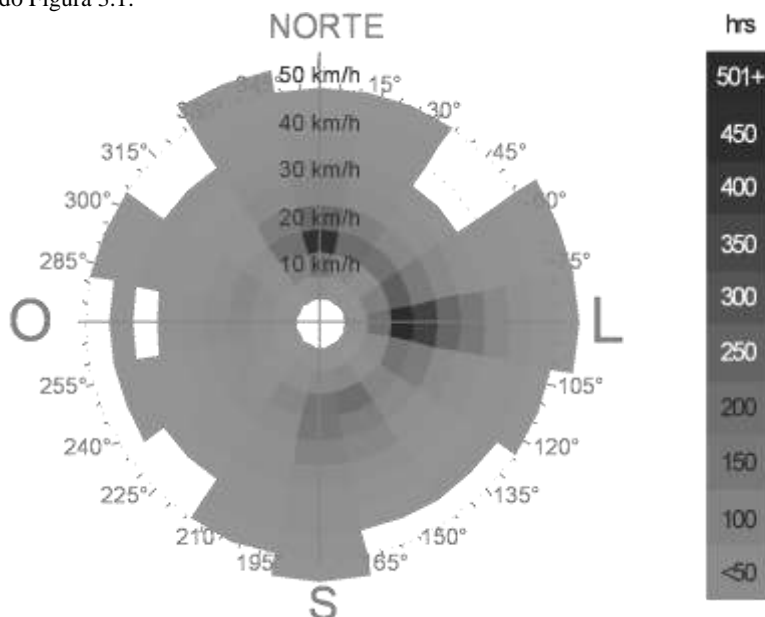


Figura 3.2 - frequência, direção e velocidade dos ventos em Campo Grande

Na figura a velocidade é lida através da distância do centro, a direção é dada pela direção dentro do diagrama de eixos polares e a frequência em horas é lida a partir da cor referente a legenda lateral.

3.3. Análise de influência dos parâmetros de ventilação

3.3.1. Definição do Modelo experimental

Para a análise experimental foi definido um modelo hipotético representando um edifício multifamiliar vertical com duas unidades habitacionais por pavimento, onde cada unidade habitacional possui quatro ambientes. O modelo foi definido respeitando as limitações dos métodos de determinação dos parâmetros de ventilação adotados no *EnergyPlus*, a fim de atender aos requisitos dos programas usados com um único modelo. A geometria deste modelo não tem o compromisso de representar uma edificação existente ou convencional, pois será usado para avaliar os parâmetros de ventilação. As quatro zonas de cada unidade representam sala, quarto, banheiro e cozinha.

No caso dos coeficientes de pressão (C_p) a maioria das fontes limita seus valores a edificações de formato retangular. No *EnergyPlus* o cálculo do coeficiente de pressão superficial utiliza duas equações, uma para edifícios baixos (Swami e Chandra, 1988) e outra para edifícios altos (Akins, 1976). Nestes cálculos, edifícios baixos são aqueles que sua altura é menor que três vezes o menor lado de sua base e edifícios altos aqueles que sua altura é maior que três vezes o menor lado de sua base. O TNO C_p Generator e o C_p Calc não diferenciam o método de cálculo em relação à altura do edifício. Na Tóquio Database são disponibilizados dados de uma base de simulações realizadas em túnel de vento para uma série de proporções de formas regulares e irregulares.

No caso do coeficiente de descarga, os valores encontrados na bibliografia limitam-se, normalmente, a aberturas retangulares (ALLARD, 1998; FLOURENTZOU ET AL., 1998; SANTAMOURIS, 2002; AYNSLEY, 1999). Alguns autores apresentam tabelas com coeficientes de descarga em aberturas com alguma variação, porém os valores sempre se referem a janelas ou portas retangulares. Sendo que nesta análise a variação está por conta do valor do coeficiente de pressão e não pela geometria da abertura.

O perfil de rugosidade do entorno é um parâmetro que não interfere na geometria do modelo, portanto não se aplica às limitações de definição em sua geometria.

Respeitando as limitações impostas para determinação dos parâmetros descritos anteriormente foi definido um modelo de edifício multifamiliar vertical de cinco pavimentos com dois apartamentos por andar. A base de Tóquio é a fonte que apresenta maiores limitações, assim o modelo foi definido com dimensões de 6m de largura, 18m de comprimento e 12m de altura, correspondente a edifícios de proporção 300:100:200 desta base, ver Figura 3.3. Os valores disponíveis para este modelo são apenas para rugosidade do entorno de $\alpha = 0,25$, equivalente a um meio urbano de edificações térreas. Para fim de comparação, estas limitações permitem a modelagem, sem restrições, no *EnergyPlus* e no TNO C_p generator.

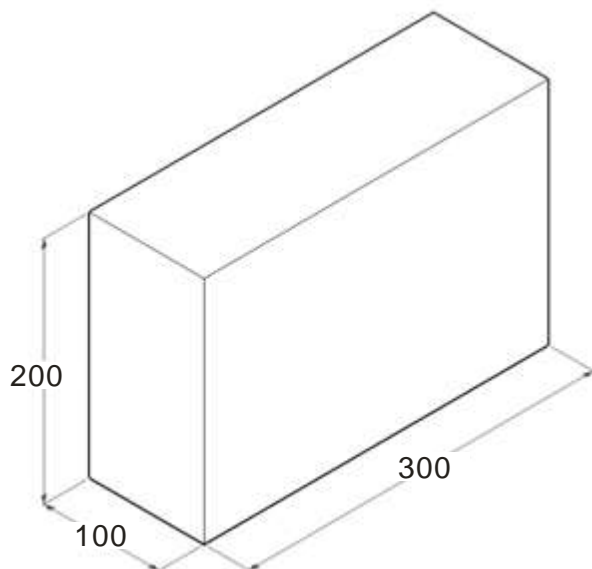


Figura 3.3 – proporção limitada pelos pré-requisitos para estimativa de CPs

Assim o modelo experimental é composto por 10 apartamentos distribuídos em 05 pavimentos com duas unidades habitacionais cada. Cada unidade habitacional foi definida por um prisma retangular com 6m de largura, 8m de comprimento e 2,4m de altura, com área total de 42 m². Estas dimensões são referentes à áreas livres dos ambientes, sendo o pé direito de 2,4m livre das espessuras de laje e piso. Paredes internas dividem este volume em quatro zonas: sala, quarto, banheiro e cozinha. O modelo possui 510m² de área total, incluindo circulação.

Como uma unidade habitacional hipotética o modelo possui aberturas distribuídas a fim de proporcionar ventilação natural por seus ambientes, conforme apresentado na Figura 3.4.

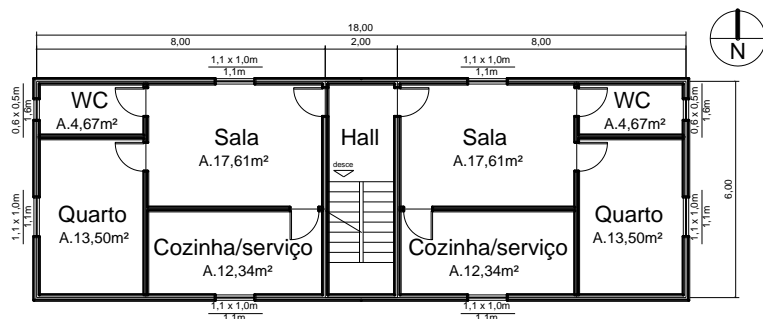


Figura 3.4 - Planta do modelo experimental

Para este modelo foram definidas apenas as dimensões das aberturas, pois na simulação paramétrica os valores de coeficiente de descarga são relacionados à tipos diferentes de janela. Foi adotada uma janela padrão para a sala, quarto e cozinha com abertura retangular de 1,10m de largura, 1,00m de altura e peitoril de 1,10m. Estas janelas representam aproximadamente 8% da área de piso do quarto e cozinha, e 6% da área da sala. Estas janelas foram modeladas com área 100% envidraçada e sombreamento durante todo o ano. Para que a janela represente uma esquadria de 100% de abertura para ventilação, o fator de abertura horizontal para ventilação foi definido como 1,0. Na janela do banheiro foi definida uma abertura retangular de 0,60m de largura e 0,50m de altura, com peitoril a 1,60m de altura. As aberturas de portas são iguais para todos os ambientes, aberturas de 2,10m de altura com 0,80m de largura.

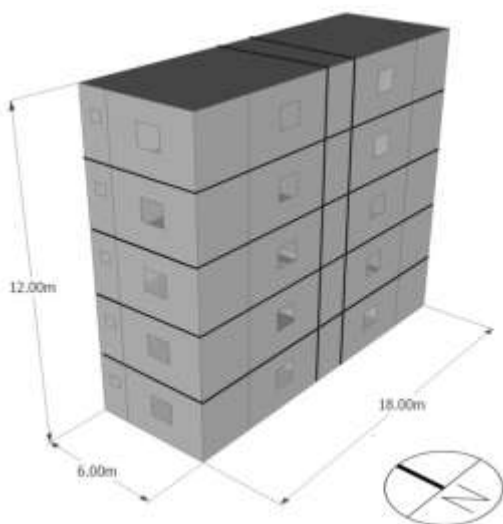
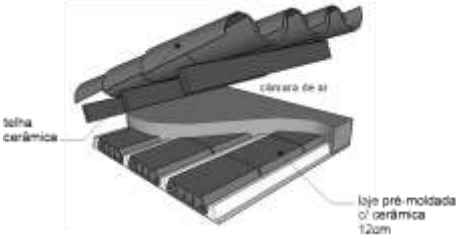
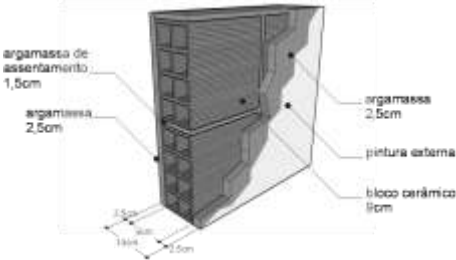
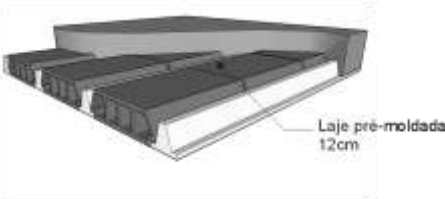


Figura 3.5 – Esquema volumétrico do modelo experimental

As propriedades das construções de paredes e coberturas foram definidas

com base nos materiais típicos utilizados em edificações residenciais brasileiras, detalhados pela NBR-15220: Desempenho térmico de edificações – Parte 3. A modelagem dos materiais para a simulação foi feita calculando a transmitância e capacidade térmica das paredes e cobertura de acordo com a NBR- 15220: Desempenho térmico de edificações – Parte 1. A transmitâncias (U) e capacidade térmica (CT) das paredes e cobertura foram obtidas na Tabela D.3 da Parte 3 da NBR 15220, que apresenta valores de transmitância e capacidade térmica já calculados para alguns tipos de construções de paredes e coberturas. As propriedades das paredes e cobertura usadas no modelo experimental são detalhadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 –Paredes e coberturas adotadas no modelo experimental

Cobertura			
	Laje pré-moldada c/ cerâmica (12cm)		
	Câmara de ar (>5cm)		
	Telha Cerâmica		
	U	CT	α
	1,9	113	0,4
Paredes			
	Argamassa interna (2,5cm)		
	Bloco cerâmico (9cm)		
	Argamassa externa (2,5cm)		
	Pintura externa (α)		
	U	CT	α
	2,2	167	0,4
Laje entre apartamentos			
	Laje armada em blocos cerâmicos,vigotas em concreto armado.		
	Espessura total 12cm, rebocada.		
	U	CT	α
	4,4	240	0,4

A pintura considerada para as paredes externas é na cor cinza, com absorvân-

cia (α) de 0,40. A cobertura é composta por laje pré moldada com cerâmica e telhas cerâmicas com absortância (α) de 0,4. As Janela são de vidro simples, 3mm, com fator de solar de 0,87.

3.3.2. Cargas internas e padrões de uso

Para o modelo experimental os sistemas de iluminação, equipamentos e padrões de uso e ocupação adotados foram baseados no trabalho de Matos (2007), que em sua dissertação estudou a simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural no EnergyPlus. Entretanto foram feitas adaptações a fim de simplificar as cargas e padrões de uso para uma análise isolada dos resultados do comportamento da ventilação natural.

O padrão de ocupação do modelo representa uma família composta por um casal. Os padrões de ocupação foram modelados para dias úteis e fins de semana, apresentados nas Figuras 3.6 e 3.7. Nestes gráficos o eixo das ordenadas representa o número total de ocupantes, a ocupação do apartamento é representada pelo valor total da barra e a ocupação de cada ambiente é representada por suas divisões de cores distintas, conforme legenda.

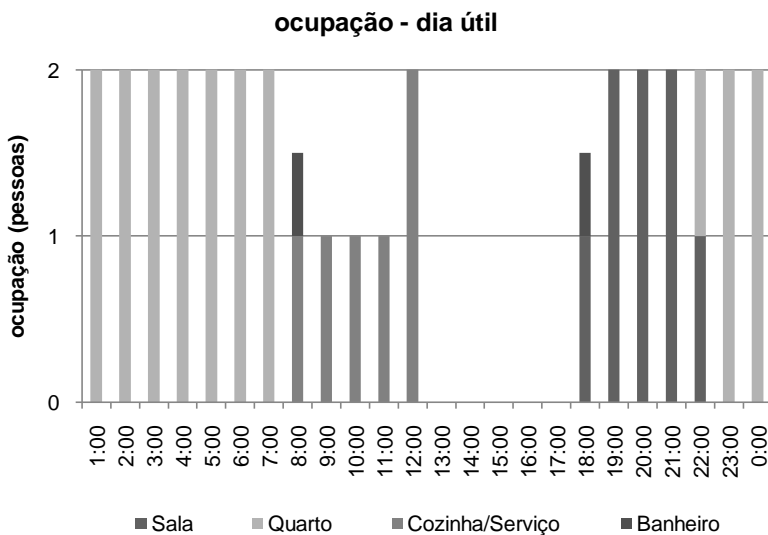


Figura 3.6 – Padrão de ocupação para dia útil

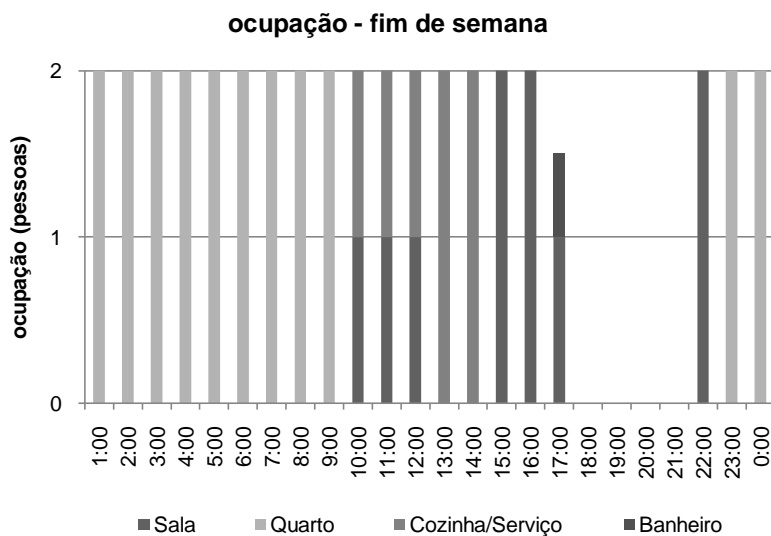


Figura 3.7 – Padrão de ocupação em fins de semana

Adotou-se potência instalada de iluminação de 40W no banheiro, 60W no dormitório e 100W na cozinha e sala. O padrão de uso de iluminação foi definido para cada cômodo da edificação em função da ocupação.

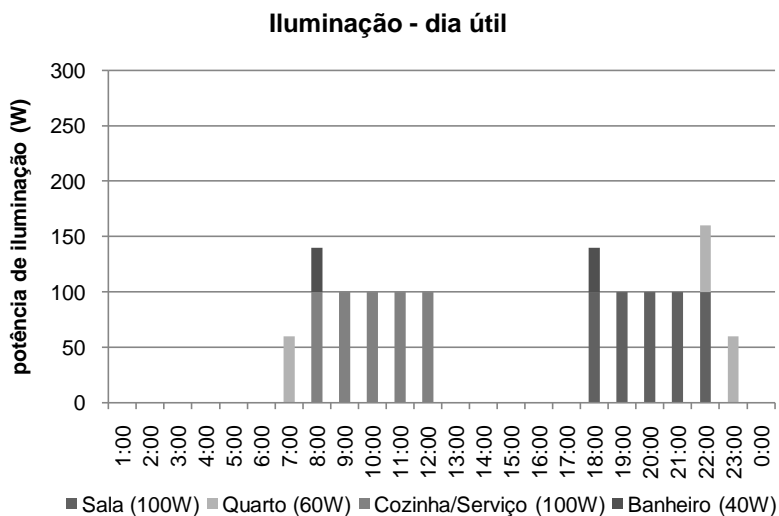


Figura 3.8 – uso de iluminação em dia útil

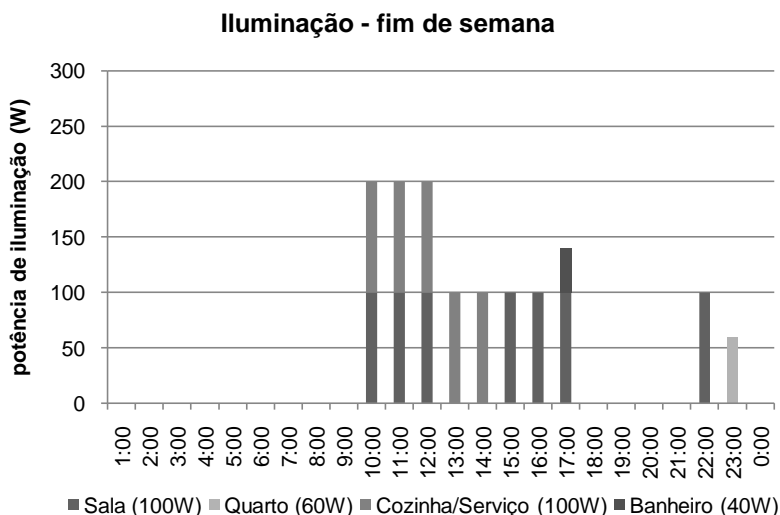


Figura 3.9 – uso de iluminação fins de semana

Na determinação dos equipamentos instalados no modelo tomou-se como base os modelos propostos por Tavares (2006), que para sua tese sintetizou um padrão de posse e uso de equipamentos domésticos em edificações brasileiras típicas, conforme a distribuição de renda por consumo de energia elétrica. Assim foi determinado para o modelo os seguintes aparelhos: aparelho de som, chuveiro elétrico, ferro de passar, fogão, refrigerador, liquidificador, televisão e ventilador. O tempo médio de uso de cada equipamento foi estimado com base na tabela de consumo de eletrodomésticos do PROCEL (PROCEL, 2008) e os valores de consumo foram ponderados para consumo hora por dia, conforme Tabela 3.4. Para a simulação foi criado um padrão de uso para cada equipamento, conforme o Figuras 3.10 e 3.11.

Tabela 3.4 – padrão de utilização de equipamentos elétricos

Equipamentos Elétricos	Potência média (W)	Média de utilização	
		Tempo	Hora/dia
Tv em cores 14"	60	4 horas/dia	4
Aparelho de som	20	1 hora/dia	1
Refrigerador	33,19	24 horas/dia	24
Chuveiro	3500	7 min/banho	0,12
Ventilador	65	40 horas/mês	1,33
Ferro de passar	300	3 horas/semana	0,42

Equipamentos - dia útil

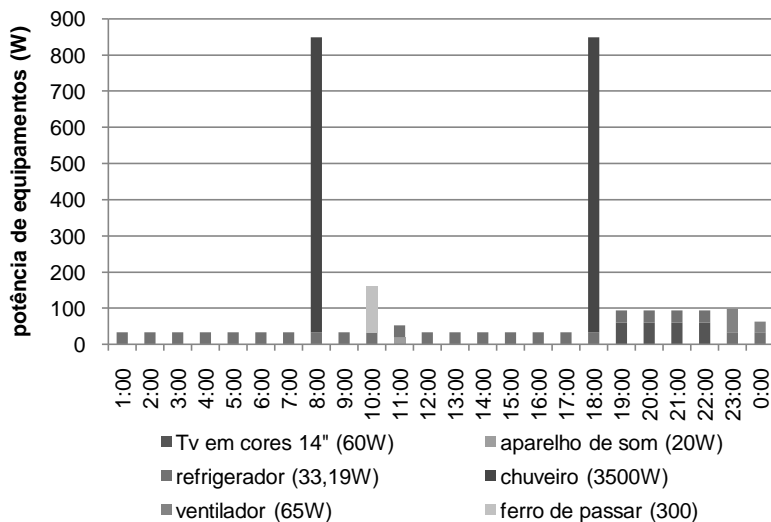


Figura 3.10 – uso de equipamentos em dia útil

Equipamentos - fim de semana

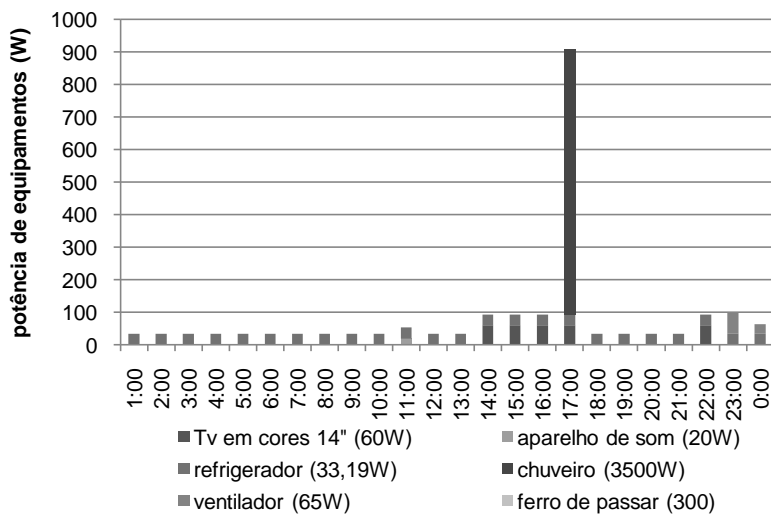


Figura 3.11 – uso de equipamentos em dia útil

3.3.3. Padrão de Ventilação

Como controle do sistema de ventilação natural foi definida uma rotina de uso de controle seletivo, especificando quando as aberturas devem ser abertas ou fechadas para manter a temperatura interna dentro do intervalo de conforto estabelecido. Assim, as janelas são abertas quando as seguintes condições são atendidas:

- Quando a temperatura interna do ar é igual ou superior à temperatura máxima estabelecida ($\text{Temperatura Interna} \geq \text{Temperatura estabelecida [20}^{\circ}\text{C]}$);
- Quando a temperatura do ar interno é superior à temperatura do ar externa ($\text{Temperatura Interna} \geq \text{Temperatura Externa}$).

Esta condição de controle seletivo só ocorre durante os horários definidos por outro padrão de uso. Deste modo, para permitir a ventilação noturna, as janelas estarão sujeitas a estarem abertas, atendendo as condições de temperatura descritas anteriormente, durante o dia todo, sendo que as portas internas permanecerão sempre abertas. Assim, as janelas são abertas quando a temperatura interna do ar maior que a temperatura do ar externo e é igual ou superior à 20°C ,

3.3.4. Conferência do modelo

O modelo simulado foi avaliado quanto ao funcionamento de seu sistema de ventilação. Para isso foi realizado um balanço de fluxo de ar para verificar o funcionamento da rede de ventilação. Este balanço foi feito a fim de qualificar o modelo para as simulações paramétricas.

O modelo de ventilação foi conferido com o balanço de fluxo de massa de ar de um dos apartamentos. O modelo de rede do *EnergyPlus* permite solicitar, como dado de saída, o volume de massa de ar horário que passa por cada nó da rede de ventilação. Com estes valores é possível fazer um balanço entre o volume de ar que entra pelas aberturas de um ambiente com o volume de ar que sai. Este balanço de fluxo de massa de ar serviu como conferência da rede de ventilação simulada pelo *EnergyPlus*.

3.3.5. Parâmetros de ventilação adotados para análise

Para analisar a influência dos parâmetros de ventilação nos resultados do *EnergyPlus* foram feitas simulações com valores de parâmetros de ventilação provenientes de diferentes fontes e bibliografias. Cada parâmetro é obtido de forma diferente. Assim, na Tabela 3.5 abaixo, são descritos brevemente, o métodos de obtenção de cada parâmetro em sua respectiva fonte.

Tabela 3.5 – Fontes de C_p s

Coeficiente de Pressão		
Fonte	Método de obtenção do C_p	Características
<i>EnergyPlus</i> (Swami e Chandra, 1988)	Calculado pelo próprio <i>EnergyPlus</i> no modo LowRise. Indicado para edificações cuja altura é menor que três vezes o menor lado de sua base.	Planta retangular Não considera obstáculos vizinhos Considera diversos padrões de rugosidade do terreno C_p médio da superfície
<i>EnergyPlus</i> (Akins, 1976)	Calculado pelo próprio <i>EnergyPlus</i> no modo HighRise. Indicado para edificações cuja altura é maior que três vezes a menor largura de sua base	Planta retangular Não considera obstáculos vizinhos Considera diversos padrões de rugosidade do terreno C_p médio da superfície
TNO C_p Generator (Knoll et al, 1996)	Calculado em interface online sem limitações ao tamanho do edifício	Planta retangular Considera obstáculos vizinhos Considera diversos padrões de rugosidade do terreno C_p para qualquer ponto
C_p Calc (Grosso, 1992)	Calculado pelo programa C_p Calc	Planta retangular Não considera obstáculos vizinhos Considera diversos padrões de rugosidade do terreno C_p para qualquer ponto
Tokyo Database	Base de dados – Banco de dados com resultados completos de testes em túnel de vento	Volumes pré-definidos Não considera obstáculos vizinhos Considera poucos padrões de rugosidade do terreno C_p para diversos pontos na superfície

No caso dos coeficientes de descarga (CD), diversos autores indicam um valor médio, tabelas ou equações para definição deste parâmetro. A Tabela 3.6, abaixo, apresenta os valores de CD indicados por alguns deles. A partir desta matriz foi definida a variação dos valores a serem simulados como CD no modelo experimental.

Tabela 3.6 – Fontes de Coeficientes de descarga

Coeficiente de descarga		
Fonte	Valores indicados	CD médio indicado
<i>EnergyPlus</i> (Default)	1,00	-
Allard, 1998	entre 0,65 e 1,0	0,78
Aynsley, 1999	-	0,60
Santamouris, 2002	-	0,65
Flourentzou et al., 1998	entre 0,5 e 0,7	-
Clezar e Nogueira, 1999	0,40 a 0,85 (Tabela 2.1)	-

Os coeficientes e expoentes de fluxo de massa de ar por frestas são utilizados nos cálculos de ventilação quando as aberturas estão fechadas. A Tabela 3.7 apresenta valores indicados que serão utilizados para estabelecer o intervalo a ser

simulado nas simulações paramétricas.

Tabela 3.7 – Fontes de Coeficientes e expoentes de fluxo de massa por frestas

Coefficiente e expoente de fluxo de massa quando as aberturas estão fechadas		
Fonte	C_0 (kg/s-m)	Expoente (n) indicado
<i>EnergyPlus (Default)</i>	0,001	0,65
AIVC (Liddament, 1979)	Tabela 3.8	Tabela 3.8
Santamouris (2002)	-	0,65

Tabela 3.8 – Coeficientes e Expoentes de fluxo de massa por frestas adotados para portas e janelas

Tipo de Janela	Veda-ção	materi-al	Flow Exponent (n)			Flow Coefficient (kg/s.m)		
			Max	Med	Min	Max	Med.	Min.
Pivotante-eixo horizontal superior	com vedação	Metal	0.64	0.6	0.52	0.00071	0.00041	0.00023
2 folha - Deslizamento horizontal	sem vedação	Metal		0.63		0.00056	0.00028	0.00016
Porta de madeira 1 folha Pivotante	sem vedação	Interna	0.79	0.59	0.51	0.00437	0.00204	0.00063

Fonte: Adaptado de Liddament(1986)

Para definir a influencia da variação da rugosidade do entorno serão feitas simulações com os valores indicados pelo *EnergyPlus* (2006) e pela ASHRAE (2003). A Tabela 3.8 descreve o perfil de diferentes tipos de entorno e seu valor correspondente α , que caracteriza sua rugosidade.

Tabela 3.8 – Variação do coeficiente de rugosidade do entorno

Descrição do entorno	Condições do Entorno (<i>EnergyPlus</i>)	Expoente α (ASHRAE)
Centro de cidade grande, com pelo menos 50% das edificações maiores que 21m à distância de 2km ou 10 vezes a altura do edifício.	0,33	0,33
Área urbana ou suburbana, arborizada ou terreno com várias obstruções. À distância de 2km ou 10 vezes maior que a altura do edifício.	0,22	0,22
Terreno aberto com obstruções escassas menores que 10m, arredor típico de estação meteorológica.	0,14	0,14

Fonte: *EnergyPlus*(2006) e ASHRAE (2003)

3.3.6. Análise de Influência dos parâmetros de ventilação

Para obter o impacto de cada parâmetro de ventilação isolado foram feitas simulações variando cada valor separadamente, ou seja, foram realizados conjuntos de simulações com apenas um parâmetro sendo variado. Os parâmetros que não

fazem parte da variação em cada conjunto foram fixados nos valores *default* indicados pelo programa *EnergyPlus*³. Os resultados das simulações foram avaliados através de gráficos e tabelas contendo trocas de ar e graus hora de refrigeração pelos parâmetros correspondentes avaliados.

Para otimizar a quantidade de simulações, exceto no caso dos C_p s⁴, os parâmetros foram simulados com valores extremos e médios de forma a verificar a tendência dos resultados. Por exemplo, no caso da rugosidade do terreno, foram simulados primeiramente os valores de 0,14, 0,22 e 0,33. A Tabela 3.9 apresenta os conjuntos de fontes ou valores de cada parâmetro que foram simulados.

Tabela 3.9 – Conjuntos de parâmetros simulados

	Parâmetros	Fontes ou valores variados
Conjuntos de simulações	Coefficientes de Pressão	<i>EnergyPlus</i> (LowRise); <i>EnergyPlus</i> (HighRise); TNO C_p Generator; C_p Calc; Tokyo Database
	Coefficientes de Descarga: Janelas e Portas	0,40 – 0,60 – 0,80 – 1,00
	Coefficientes e Expoente de Fluxo de massa para aberturas fechadas: Janelas e Portas	<i>Default EnergyPlus</i> 0,001; Valores máximos, médios e mínimos da tabela de Liddament (1979)
	Rugosidade do entorno	0,14 - 0,22 - 0,33

No total foram feitos 4 conjuntos de simulações com parâmetros sendo variados. Foram feitas 5 simulações variando coeficientes de pressão, 4 variando coeficientes de descarga das aberturas, 4 com coeficientes e expoentes de fluxo de massa de ar e 3 tipos de entorno. Resultando num total de 15 simulações do modelo referencial com parâmetros de ventilação diferentes. Como cada simulação do edifício processa valores para suas 10 unidades habitacionais, as simulações resultaram em 150 casos de apartamentos diferentes.

3.3.7. Análises de desempenho

Para a análise dos resultados das simulações foram solicitados como relatórios de saída do programa *EnergyPlus* os valores horários de volume de infiltração de ar externo (*Zone Infiltration Volume [m³]*), o volume de ar proveniente de zonas adjacentes (*Zone Mixing Volume [m³]*) e temperatura operativa de cada zona.

3.3.7.1. Desempenho de ventilação

Como forma de avaliar o desempenho de ventilação natural foi calculada a média anual de renovações de ar por hora de cada ambiente. Esse valor foi obtido a partir da média horária anual da razão do volume de cada ambiente pelos valores de infiltração de ar externo somados a infiltração de ar proveniente de outras zonas.

³ Com exceção do Coeficiente de Fluxo de massa para aberturas fechadas, em que foram adotados o valor indicado nos arquivos de exemplo que fazem parte do pacote de instalação do *EnergyPlus*.

⁴ Os C_p s variam por fonte e não por valores

3.3.7.2. Desempenho térmico

Para avaliação do desempenho térmico foram calculados os números acumulados de graus hora anuais de temperatura operativa para cada ambiente. O parâmetro graus hora é definido como sendo o somatório da diferença de temperatura horária, quando esta se encontra acima de uma temperatura base, no caso de graus hora de resfriamento ou abaixo da temperatura base, para aquecimento. Nos cálculos de graus hora de refrigeração feitos para a análise dos edifícios foi adotado a temperatura de refrigeração de 26°C, significando que, quando a temperatura do ar interna estiver acima de 26°C o excedente é somado ao total de graus hora de refrigeração anual. Como o clima de Campo Grande demanda apenas estratégias de refrigeração, os graus hora de aquecimento não foram considerados.

O método de graus hora é indicado como uma maneira simples para análises energéticas. De forma geral, os valores de graus hora podem ser utilizados para estimar a carga anual de refrigeração ou aquecimento para o ano todo ou apenas um período. Assim, este método é um bom indicador para se analisar o desempenho térmico de edificações residenciais naturalmente ventiladas, pois considera as condições de conforto do usuário sem condicionamento artificial.

3.4. Desempenho térmico de modelo de edifício real

Após conhecer a influência dos parâmetros de simulação de ventilação natural no desempenho térmico de um modelo experimental, onde se respeitou as limitações de cada parâmetro, foi avaliado o desempenho de um modelo de edifício real. Nestas simulações as restrições de modelagem de cada parâmetro de ventilação foram discutidas analisando a influência destas restrições na análise do desempenho do edifício.

Foi feita a análise de um projeto de edificação real da cidade de Campo Grande, estado de Mato Grosso do Sul. O edifício é uma amostra intencional de uma tipologia de edifício multifamiliar comum na cidade com quatro apartamentos por andar e planta com formato tendendo a um “H”. Com este modelo foi discutida a aplicação da simulação de ventilação natural em uma situação que represente uma condição real. O projeto arquitetônico utilizado na elaboração do modelo foi cedido pela construtora do empreendimento. Para este trabalho o modelo será identificado como Modelo Real.

3.4.1.1. Descrição do Modelo Real

O Modelo Real representa um edifício residencial multifamiliar de 12 pavimentos com 4 apartamentos cada, totalizando 48 apartamentos de aproximadamente 79m². Sua planta tende ao formato de “H”, com alguns recortes, como é apresentado na Figura 3.12. Sua altura é de 38m sobre uma base de 20,35 por 23,80m. O primeiro pavimento não está em contato com o solo, abaixo dele, no nível térreo, está a garagem aberta sob os pilotis. Ainda abaixo dos pilotis existem um nível de subsolo, que não foi considerado para o desenvolvimento do trabalho.

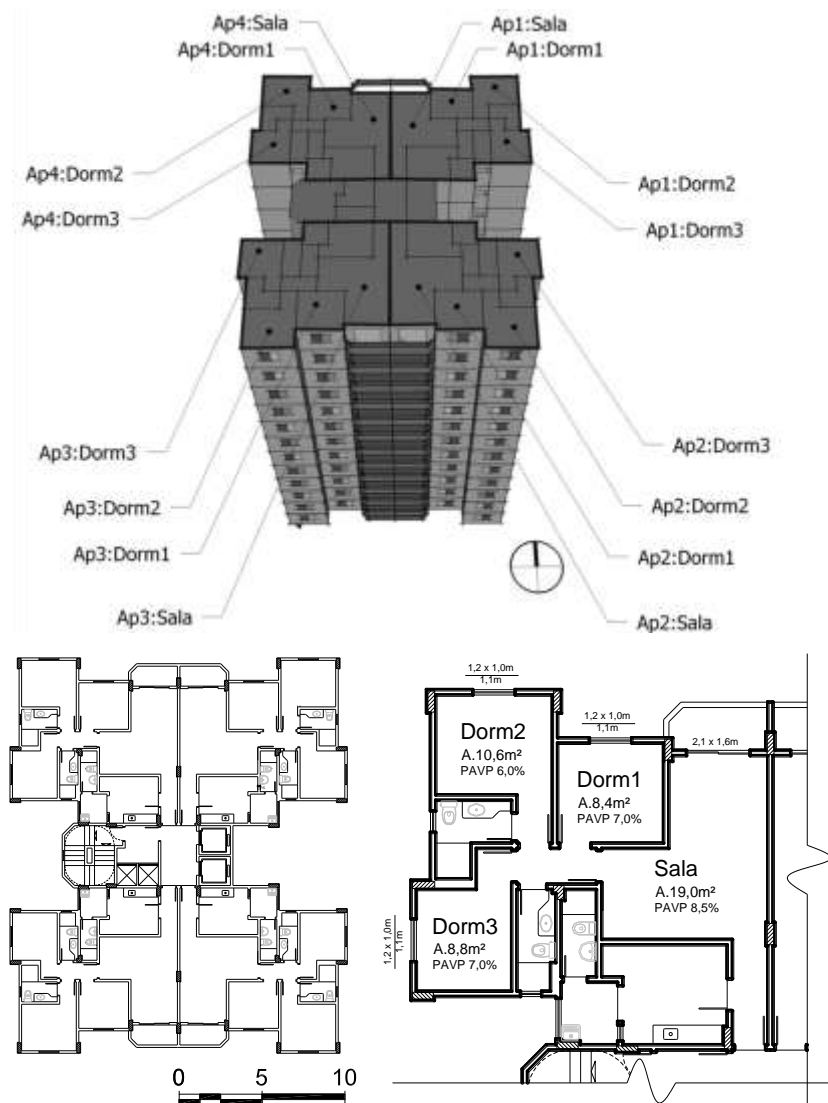


Figura 3.12 – Esquema e plantas do pavimento tipo e apartamento do Modelo real

No *EnergyPlus*, foram modeladas as zonas térmicas para todos os ambientes de cada unidade habitacional. Também foram modelados todos os pavimentos do edifício para se poder analisar a influência da altura no desempenho térmico de cada zona térmica.

As janelas dos quartos são do tipo de correr com dimensões de 1,2m de lar-

gura por 1m de altura com 50% de fator de abertura horizontal de ventilação e iluminação, pois possui uma folha de veneziana externa de correr que sempre cobre metade da janela. Esta abertura proporciona uma percentagem de área de ventilação pela área do piso (PAVP) de 7% para os dormitórios 1 e 3, e 6% para o dormitório 2. Na sala, a abertura é uma porta janela de correr de 2,1x1,60m com fator de abertura de 50% abrindo para uma sacada, conferindo à sala um PAVP de 8,5%. Na lavanderia a janela é formada por duas folhas de correr no eixo horizontal de dimensões 1,2x1m com fator de abertura de 50% de ventilação. Nos banheiros as janelas são do tipo Máximo-ar de 0,6x0,6m. As portas internas são de 0,8m de largura e 2,1m de altura, sendo as portas dos banheiros de 0,7m de largura.

As construções de paredes e cobertura foram modeladas com seus materiais e construções de acordo com o projeto arquitetônico. A tabela 3.10 apresenta as propriedades dos elementos construtivos do edifício.

Tabela 3.10 –Paredes e coberturas adotadas no modelo experimental

LAJE ENTRE PAVIMENTOS

Material	Esp. m	Condutividade W/m.K	Densidade Kg/m ³	Calor Específico J/kg.K
Piso Cerâmico	0,01	0,9	1600	920
Argamassa de reboco	0,025	1,15	2	1
Laje de concreto	0,12	1,44	2100	1
Argamassa de reboco	0,025	1,15	2	1

ALVENARIA DAS PAREDES

Material	Esp. m	Condutividade W/m.K	Densidade Kg/m ³	Calor Específico J/kg.K
Argamassa de emboço	0,025	1,15	2	1
Cerâmica de Tijolo 8 furos	0,082	0,9	868	920
Câmara de ar do tijolo	0,02 – 0,05	Resistência térmica 0,16 m ² .K/W		
Cerâmica de Tijolo 8 furos	0,082	0,9	868	920
Argamassa de emboço	0,025	1,15	2	1

COBERTURA

Material	Esp. m	Condutividade W/m.K	Densidade Kg/m ³	Calor Específico J/kg.K
Telha de zinco	0,005	110	7200	380
Câmara de ar do ático	> 0,05	Resistência térmica 0,61 m ² .K/W		
Argamassa de reboco	0,025	1,15	2	1
Laje de concreto	0,12	1,44	2100	1
Argamassa de reboco	0,025	1,15	2	1

A pintura considerada para as paredes externas é na cor cinza claro, com absorvância (α) de 0,40. A cobertura é composta por laje maciça de concreto e telhas metálicas com absorvância (α) de 0,4. As Janela são de vidro simples, 3mm, com fator de solar de 0,87.

Tabela 3.11 – síntese dos modelos real

	Modelo Real
Aptos	48
Andares	12
Aptos/andar	4
Área do apto	79m ²
Altura	38,35m
Forma da Edificação	“H”

3.4.1.2. Detalhamento das aberturas

As portas internas são de madeira do tipo de abrir com eixo pivotante vertical na aresta lateral. As dimensões destas portas são de 2,10m de altura por 0,80m de largura, sendo as portas dos banheiros com 0,70m de largura. Foram modeladas no *EnergyPlus* conforme suas dimensões e materiais. Como elemento de ventilação foi modelado com dois fatores de abertura: toda aberta ou toda fechada.

As janelas dos banheiros são do tipo maximo-ar de uma folha sem grade com vidro mini boreal. Suas dimensões são de 0,60m de largura por 0,60 de altura. O ângulo de abertura é de 60° e a projeção da abertura é de 0,58m. A janela está representada na figura 3.13, com esquema e foto. Elas foram modeladas no *Energy-Plus* conforme dimensões e vidro. No detalhamento como elemento de ventilação foram consideradas como pivotante com dois valores de fator de abertura: totalmente fechada ou 47%, considerando a projeção de obstrução da folha a 60° de abertura.

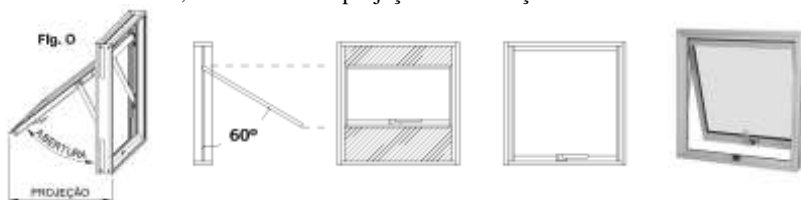


Figura 3.13. Janela Maximo-ar.

Na lavanderia a janela é do tipo de correr com duas folhas de vidro. Suas dimensões são de 1,20m de largura e 1,0m de altura, com vão livre de 0,90m de altura por 0,56m de largura, representada pela figura 3.14. Foram modeladas para simulação conforme suas dimensões e vidro. Como elementos de ventilação foram adotados fatores de abertura horizontal zero, para a janela fechada, e 0,50 para a janela totalmente aberta.



Figura 3.14. Janela com duas folhas de correr

A porta da sala para a sacada é do tipo de correr com duas folhas. Nas dimensões de 2,18 x 1,60m, e vão livre de 2,07m x 0,65m, conforme figura 3.15. Foram modeladas como portas de vidro conforme dimensões e material. E em seu detalhamento como elementos de ventilação foram adotados fatores de abertura horizontal zero, para a porta fechada, e 0,50 para a porta totalmente aberta.

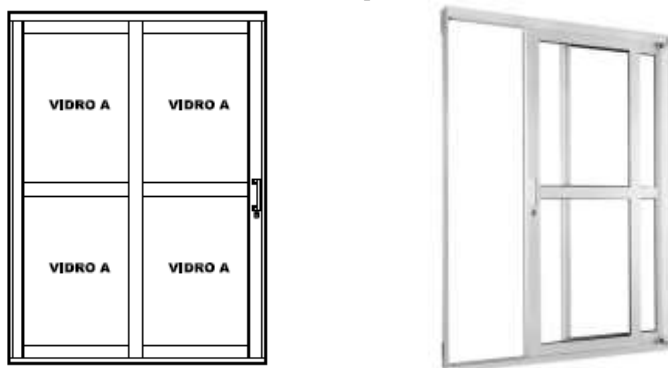


Figura 3.15. Porta de duas folhas de correr

As janelas dos quartos são do tipo veneziana de correr com 3 folhas, sendo uma de vidro simples, uma de chapa metálica do tipo veneziana e outra de chapa metálica fechada. Suas dimensões são de 1,20m de largura e 1,0m de altura, porém a abertura de ventilação é limitada a metade da abertura total, sendo o vão livre de 0,90m de altura por 0,56m de largura. Esta janela está representada na figura 3.16, abaixo.



Figura 3.16. Janela tipo veneziana com três folhas de correr

As janelas do tipo veneziana foram modeladas no *EnergyPlus* como janelas retangulares de vidro conforme suas dimensões. A obstrução da folha metálica fechada foi modelada como um elemento de sombreamento cobrindo metade da janela. Para simular o efeito do sombreamento da folha de veneziana móvel foi modelado um brise com a classe *WindowMaterial:Blind* do *EnergyPlus* controlada de acordo com um setpoint de temperatura interna. Quando a temperatura interna da zona for maior que 23°C a janela é sombreada pela veneziana, coincidindo com o controle de ventilação descrito no próximo parágrafo.

Como elemento de ventilação esta janela foi modelada com três fatores de abertura: janela fechada com vidro; janela fechada com veneziana; janela aberta. Estes três níveis de abertura são controlados conforme a diferença de temperatura interna e externa, conforme ilustra o gráfico da figura 3.17, a seguir.

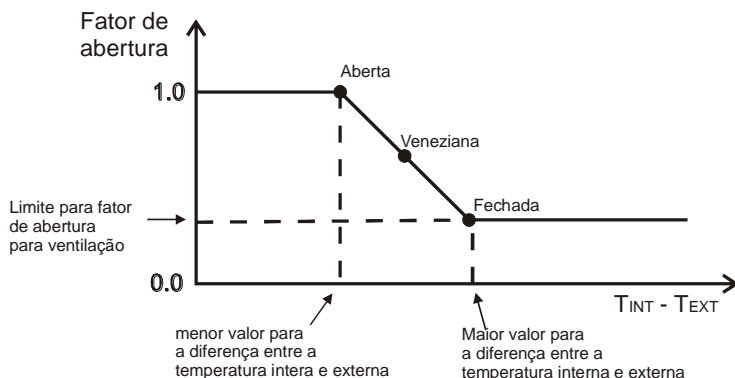


Figura 3.17. Abertura de ventilação conforme temperatura interna e externa

A diferença de temperatura estabelecida para o controle fechar as janelas foi definida como 0°C, ou seja, a partir do momento que a temperatura externa for maior ou igual à interna a janela começará a ser fechada. A maior diferença entre as temperaturas internas e externas para que a janela esteja totalmente fechada foi definida como 6°C, deste modo quando a temperatura externa for 3°C maior que a interna a janela estará fechada com a veneziana e quando for maior que 6°C a janela

se fechará com a folha de vidro.

Além disso, para todas as janelas externas, o controle da ventilação foi definido através de uma rotina de controle seletivo, especificando quando as aberturas devem ser abertas ou fechadas para manter a temperatura interna dentro do intervalo de temperatura estabelecido. As janelas são abertas quando a temperatura interna do ar for maior que a temperatura do ar externo e é igual ou superior à 20°C, conforme figura 3.18.

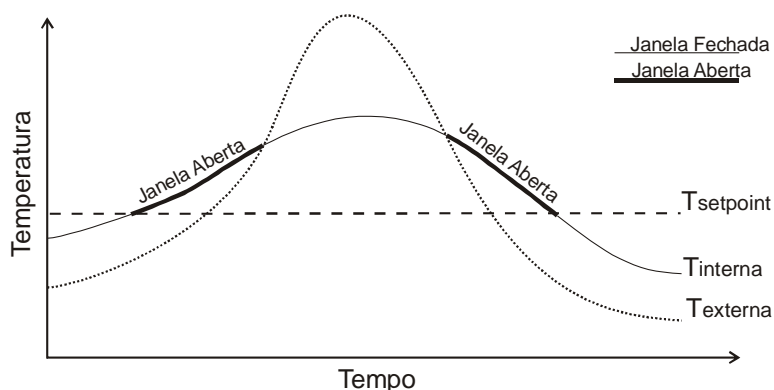


Figura 3.18. Condições de abertura das janelas externas

3.4.2. Características de uso e ocupação

Para caracterização do uso e ocupação da edificação adotou-se como base os levantamentos do trabalho de Tavares (2006), que definiu modelos de edificações que representassem as principais características físicas e ocupacionais de edificações típicas brasileiras, compilando os dados da Pesquisa Nacional de Amostras de Domicílio de 2002 e da Pesquisa de Sistema de Informações de Posses de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo de 1999. Seu modelo de edificação multifamiliar de média renda foi adotado como referência, pois segue a perspectiva futura de urbanização e verticalização nos centros urbanos, que embora represente um número reduzido de edificações, apresenta melhores dados de renda e posses, visando cenários futuros de melhor distribuição de renda. A Tabela 3.11 apresenta as características do modelo de Tavares (2006), adotado como referência para a elaboração dos padrões de ocupação dos ambientes e o uso de equipamentos e iluminação.

Tabela 3.15 – Características típicas de edificações multifamiliares brasileiras

Nº Habitantes	3
Renda Familiar	10 Salários Mínimos
Consumo Energia Elétrica	240,00 kWh/mês
Equipamentos básicos	Aparelho de som, Ar condicionado, Aspirador de pó, Batedeira, Cafeteira elétrica, Chuveiro Elétrico, Computador, Enceradeira, Exaustor, Ferro de passar, Fogão, Forno de Microondas, Forno elétrico, Freezer, Geladeira, Impressora, Lava louças, Lavadora de roupa, Liquidificador, Máquina de costura elétrica, Microcomputador, Secadora de roupa, Televisão, Ventilador, Videocassete, Videogame
Área da unidade	100m ²
Dimensões Totais	8 Pavimentos – 32 unidades Área Total 4340m ² Área do Pav. Tipo 475m ² Área do terreno 650m ² Externas 18x29m
Divisões internas por unidade	Pé direito 2,8m Salas 32,0m ² 3 Quartos 35,6m ² Cozinha 10,5m ² 2 Banheiros 7,0m ² Quarto de empregada 3,8m ² Banheiro de empregada 1,4m ² Área de serviço 3,0m ² Circulações 6,7m ²

Fonte: adaptado de Tavares (2006)

Os padrões de ocupação dos modelos representam uma família composta por três pessoas, um casal com um filho. Os padrões de ocupação foram modelados para dias úteis e finais de semana e o padrão de uso de iluminação foi definido para cada cômodo da edificação em função da ocupação.

Tabela 4.16 – padrão de uso de equipamentos adotados nos modelos 1 e 2

Ambiente	Equipamento	Potência média (W)	Média de utilização		
			Dias/mês	Hora/dia	Wh/dia
Sala	Tv em cores - 20"	80	30	5	400.0
	Videocassete	10	8	2	5.3
	Videogame	15	15	4	30.0
	Aparelho de som	80	20	3	160.0
	Ventilador*	65	30	8	520.0
Cozinha	Geladeira	33,19	30	24	796.6
	Lavalouças	1500	30	0,66	990.0
	Liquidificador	300	15	0,25	37.5
	Batedeira	120	8	0,5	16.0
	Cafeteira elétrica	600	30	0,5	300.0
	Exaustor	170	30	4	680.0
	Fogão	60	30	0,08	4.8
	Forno de Microondas	1200	30	0,33	396.0
	Forno elétrico	800	20	1	533.3
	Aspirador de pó	100	30	0,33	33.0
Lavanderia	Enceradeira	500	2	2	66.7
	Ferro de passar	1000	12	1	400.0
	Lavadora de roupa	500	12	1	200.0
	Ar condicionado*	1000	-	-	-
Q.Casal	Ventilador*	65	30	8	520.0
Q.Solteiro	Computador/Imp./Estab.	180	30	3	540.0
	Máquina de costura	100	10	3	100.0
	Ventilador*	65	30	8	520.0
WC Suíte	Chuveiro elétrico	3500	30	0,24	840.0
WC Comum	Chuveiro elétrico	3500	30	0,12	420.0

Fonte: Adaptado de Tavares (2006) e Procel (2008)

*Equipamento não considerado

Para verificar se a definição do uso de equipamentos está condizente com o padrão típico determinado por Tavares (2006) foi estimado o consumo de energia elétrica conforme o padrão de uso de equipamentos e iluminação definidos para as simulações. Somando a uma estimativa de consumo mensal de iluminação de 55,8kWh, com a estimativa de consumo de equipamentos de 208,4kWh, obtém-se o total de 264,2kWh. Que comparado com o consumo de 240kWh indicado por Tavares (2006) sugere que o padrão de iluminação e equipamentos adotados condizem com o consumo típico brasileiro para este tipo de edificação.

3.4.3. Simulações

Com o modelo real foram feitas simulações termo-energéticas de ventilação natural com o *EnergyPlus*. As simulações foram realizadas com o arquivo climático da cidade de Campo Grande, do tipo TMY (Test Referency Year) que é montado com dados climáticos coletados na base meteorológica no Aeroporto Internacional de Campo Grande.

O formato “H”, apresentado pelo modelo, representa limitações na modela-

gem em relação aos principais parâmetros de ventilação utilizados em simulações de desempenho térmico. Para os coeficientes de descarga das aberturas não há uma metodologia específica para sua determinação. Para os coeficientes e expoentes de fluxo de ar pelas frestas existe valores adquiridos na bibliografia, porém com pouca informação para uma definição detalhada. E em relação aos Coeficientes de Pressão de vento, o maior desafio é o formato irregular do edifício.

Para analisar a influência da determinação dos parâmetros na avaliação de desempenho térmico foram analisadas duas simulações do modelo real. Uma com os valores padrão indicados pelo programa *EnergyPlus*, representando uma simulação simplificada, chamada de Simulação Padrão. A outra simulação foi realizada com parâmetros adquiridos em fontes externas, com valores determinados por métodos próprios, sendo chamada de simulação Avançada.

3.4.3.1. Coeficientes de Pressão de vento

Os valores de CP dependem da forma da edificação, da direção do vento e da influência de obstruções como edificações vizinhas, vegetação e características locais do terreno. Assim para a simulação de ventilação natural é necessário obter os valores de CPs para várias orientações de vento em cada abertura ou fachada, considerando as obstruções e o perfil do entorno. Como é um valor de difícil aquisição são adotados métodos para estimar os valores de CPs.

Nas simulações foram adotados dois tipos de determinação de CPs: um mais simplificado, calculado pelo próprio *EnergyPlus* através da equação de regressão de Akins et al (1979) para edifícios altos; e outro mais complexo, calculado pelo TNO CP Generator, que também através de regressão estima valores de CP considerando obstruções externas.

Para a simulação padrão, com os CPs calculados pela equação de Akins no *EnergyPlus* o tipo de coeficiente de pressão de vento é definido como calculo médio da superfície, considerando a altura das janelas e a proporção da largura pela altura do edifício. Porém este método tem a limitação de ser indicado para edifícios de planta retangular.

Para a simulação avançada foram adotados valores de CP calculados pelo TNO CP Generator para cada uma das aberturas do edifício. Este método permitiu maior flexibilidade na definição do modelo para aquisição de coeficientes de pressão. Com ele também só é possível definir volumetrias de planta retangular, porém com a possibilidade de inserir parâmetros de obstruções vizinhas. Com isto é possível calcular os CPs considerando as obstruções de vento que o próprio edifício faz em suas fachadas devido a sua planta côncava.

Apesar do considerável efeito das sacadas no comportamento da ventilação natural, os métodos de estimativa de CPs estudados neste trabalho não permitem avaliar a influência destes elementos neste coeficiente. Para adquirir os valores de CP através do TNO CP Generator as sacadas foram desconsideradas.

3.4.3.2. Coeficientes de Descarga das aberturas

O coeficiente de descarga (C_q) das aberturas é definido conforme o tipo de esquadria. Porém a maioria dos autores indicam valores médios de C_q entre 0,5 e 0,7 e o *EnergyPlus* indica um valor *default* para aberturas retangulares de 1,0. A

determinação do coeficiente de descarga é uma limitação na avaliação de ventilação natural. A escassez de fontes para aquisição destes dados leva a adoção de valores médios indicados pelos principais autores da área: Allard (1998); Aynsley (1999) e Flourentzou et al (1998).

Como existe uma divergência entre os autores em definir o coeficiente de descarga indicado para uma janela comum de abertura retangular foi adotado o valor médio de 0,78, indicado por Allard (1998), para a simulação Avançada e o valor de 1,00, indicado pelo *EnergyPlus*, para a simulação Padrão.

3.4.3.3. Coeficientes e expoente de Frestas

O coeficiente e expoente de fluxo de massa de ar pelas frestas das portas e janelas são definidos conforme o tipo de esquadria. Foram avaliados os resultados de simulações para analisar a influência deste parâmetro adotando-se duas fontes: o indicado pelo *EnergyPlus*, em seu arquivo de exemplo, com 0,001 para o coeficiente de fluxo de massa de ar e 0,6 para o expoente de fluxo de massa de ar por metro de fresta; e os valores indicados por Liddament (1986), na tabela da AIVC, conforme as esquadrias do projeto.






Para a determinação dos valores através da tabela de Liddament (1986) foram utilizadas as descrições das esquadrias do projeto do edifício. Assim, os coeficientes e expoentes de fluxo de massa de ar pelas frestas para cada esquadria foram definidos consultando a tabela de Liddament (1986), adotando os valores médios de cada parâmetro. Porém estes tipos de esquadrias não são encontrados exatamente como suas descrições na tabela. Assim foram definidas propriedades das frestas para as esquadrias principalmente quanto a seu tipo e vedação, sendo o material da esquadria desconsiderado quando não houver os valores para características anteriores. Os coeficientes e expoentes das frestas das esquadrias do modelo foram reunidos na tabela 3.17.

Entretanto, para a janela do tipo veneziana não há valor específico para coeficiente e expoente de fluxo de massa de ar pelas frestas da veneziana. Para definir estes valores foram feitas adaptações com os dados conhecidos. Para esta janela fechada com a folha de chapa e a folha de vidro foram adotados os mesmos que para a janela de duas folhas de correr. Porém quando se estiver usando a folha de veneziana como fechamentos foram adotados coeficiente e expoente de frestas diferenciados. Considerando que o fechamento da veneziana pode ser comparado com as frestas de uma porta comercial do tipo de enrolar (tipo de fresta mais próximo pela base de dados utilizada), foram adotados os coeficientes e expoentes de frestas deste tipo de porta para a veneziana fechada. Como na tabela de Liddament (1979) este coeficiente é indicado como 0,01810 para um metro quadrado de porta, o valor adotado para a janela do tipo veneziana foi de 0,00905 para sua área de abertura para ventilação de meio metro quadrado.

Este coeficiente também poderia ser calculado multiplicando um coeficiente de fluxo de massa de ar por metro linear de fresta pelo somatório de frestas encontradas na folha da veneziana. Considerando 6,5m de frestas na folha da veneziana e um coeficiente de fluxo de massa de ar de 0,001 por metro linear (indicado pelo *EnergyPlus*), resulta-se num coeficiente de 0,0065 para a veneziana. Portanto como valor *default* para o coeficiente da veneziana foi adotado o coeficiente obtido a partir do valor padrão do *EnergyPlus* e como valor obtido em fontes externas foi adotado o

valor indicado para portas de enrolar com base na tabela de Liddament (1979).

Tabela 3.17. Coeficientes e Expoentes de fluxo de massa de ar adotados

Janela	Descrição	Expoente (n)	Coeficiente (kg/s.m)
	Janela de três folhas de correr. Vidro/Chapa	0.66	0.00010
	Vidro/Veneziana	0.66	0.00905
	Janela de duas folhas de correr. Vidro/Vidro	0.66	0.00010
	Janela Maximo-ar com eixo horizontal superior	0.6	0.00041
	Porta de duas folhas de correr. Vidro/Vidro	0.66	0.00010
	portas internas de madeira de abrir com eixo pivotante vertical	0.6	0.00187

3.4.4. Análise de influência dos parâmetros de ventilação

Para avaliar a influência da diferença dos parâmetros de ventilação natural adotados para simulação, foram comparados os resultados da simulação padrão e avançada. Os parâmetros adotados em cada simulação são apresentados na tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Conjuntos de parâmetros simulados

	Simulação Padrão	Simulação Avançada
Coefficientes de Pressão	<i>EnergyPlus</i> (HighRise)	TNO C _p Generator
Coefficientes de Descarga:	1,00	0,78
Coefficientes e Expoente de Fluxo de massa de ar pelas frestas	<i>Default EnergyPlus</i> 0,001	Valores médios adaptados da tabela de Liddament (1979)

Para avaliar a influência dos parâmetros de ventilação foram comparados os resultados das simulações padrão

3.4.5. Análise de desempenho térmico do edifício

Assim como na análise do modelo experimental o desempenho térmico do modelo real foi calculado com o método de graus hora anuais de temperatura operativa. As simulações permitiram a aquisição de resultados para todas as zonas térmicas, ou seja, para todos os ambientes do edifício. Porém, para reduzir os dados de saída, a análise foi feita para os apartamentos do primeiro pavimento, pavimento intermediário e cobertura.

Para determinar o nível de desempenho térmico do edifício com o número de graus hora de refrigeração foi desenvolvida uma escala de referencia em relação à temperatura do ar externa. Como a avaliação é de um edifício naturalmente ventilado, e considerando que a ventilação natural tem por objetivo aproximar a temperatura do ar interna com a temperatura do ar externa, quando vantajoso, foram calculados os graus hora de refrigeração para a temperatura de bulbo seco do ar externo. Este valor foi adotado como referência para um edifício de baixo desempenho, onde os graus hora externo representa o comportamento de um ambiente com carga térmica elevada que precisa ser sempre ventilado para perder esta carga.

A partir desta referencia para um baixo desempenho a escala foi montada para quatro níveis de desempenho térmico de graus hora. Assim, o total acumulado dos graus hora externo foi dividido por quatro, afim de representar cinco níveis de eficiência. Seguindo a linha de classificação por etiquetagem de eficiência energética, estes extratos foram denominados de “A” a “E”, sendo A para o mais eficiente e o E para o menos eficiente.

Calculando os graus hora externo para o clima de Campo Grande obtemos o valor de 8995,6 graus hora de refrigeração para a temperatura base de 26°C. Este valor dividido por quatro resultou na escala de classificação de desempenho térmico apresentada na tabela 3.19. Considerando que X é o resultado simulado dos graus hora de refrigeração do ambiente do edifício, determina-se em qual intervalo de eficiência encontra-se o ambiente, definindo assim seu nível de eficiência.

Tabela 3.19 – Escala Graus hora de refrigeração para classificação de desempenho térmico

A	B	C	D	E
X < 2248	2248 > X < 4497	4497 > X < 6746	6746 > X < 8995	X > 8995

A partir desta escala definida, os resultados simulados de graus hora dos

ambientes foram classificados por nível de desempenho térmico. Para se obter o nível de cada apartamento foi considerada a ponderação das classificações dos seus ambientes de permanência prolongada, e para a determinação do desempenho térmico do edifício, foram ponderados os desempenhos de todos os apartamentos pela área.

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados analisados e discutidos das simulações descritas na metodologia. Primeiro para o modelo experimental com a análise de influência dos parâmetros de ventilação no desempenho térmico e desempenho de ventilação natural. E em seguida para o Modelo Real.

4.1. Modelo Experimental

A análise foi feita para cada conjunto de simulações com apenas a variação de um parâmetro. Para cada parâmetro são apresentadas duas tabelas: uma com as médias anuais de trocas de ar por hora (*air changes per hour* – ACH) para a análise de desempenho de ventilação natural; e outra com os graus hora de refrigeração para análise de desempenho térmico. São apresentados valores de um ambiente de cada apartamento, identificados pelo nível do pavimento, número do apartamento e nome do ambiente (pavimento:apartamento:ambiente).

Nas tabelas foram calculados os percentuais dos desvios padrão em relação à média dos valores simulados para avaliar a influência da variação do parâmetro. Esta variação foi calculada para as médias anuais de ACH e para os valores de graus hora de refrigeração.

Para facilitar a leitura das tabelas, as células de valores recebem uma formatação condicional com uma escala de cores. Para os ACH, o menor valor tem a célula verde, que em uma escala gradiente passa para a cor vermelha nas células com o maior valor, passando pela cor amarela no valor médio. Os valores de graus hora de refrigeração são representados por uma gradiente que varia de amarelo claro, para o menor valor, até alaranjado, para o maior. Ambos os valores, ACH e graus hora, são comparados entre si e com os resultados do parâmetro *default* do *Energy-Plus*. Ainda com o intuito de facilitar a análise da tabela de graus hora de refrigeração, seus valores são apresentados em gráficos.

Além disso, neste capítulo, as notas de rodapé destacam observações relacionadas a estratégias arquitetônicas de ventilação natural.

4.1.1. Coeficientes de descarga

O coeficiente de descarga, que variou entre 0,40 e 1,00 para as portas e janelas, implica numa variação das médias de ACH de cerca de 30%, independente da orientação do apartamento ou pavimento. Conforme apresentado na tabela 4.1, os ACH são maiores para os apartamentos dois, voltados para leste, orientação com maior frequência de ventos de acordo com o arquivo climático. Estes valores também são diretamente proporcionais a altura do pavimento. Quanto maior a altura, maior o número de trocas de ar por hora.

Tabela 4.1 - Médias anuais de ACH por coeficientes de descarga

MÉDIA ANUAL DE TROCAS DE AR POR HORA							
	CQ 0.40	CQ 0.60	CQ 0.80	CQ 1.00	Média	Desv. padrão	%
1PAV:AP1:DORM	3.4	4.8	6.1	7.4	5.4	1.71	31.4%
1PAV:AP2:DORM	12.0	17.3	22.4	27.5	19.9	6.68	33.6%
2PAV:AP1:DORM	4.1	5.7	7.4	8.9	6.6	2.09	31.9%
2PAV:AP2:DORM	14.9	21.5	28.0	34.4	24.8	8.40	33.9%
3PAV:AP1:DORM	4.5	6.3	8.1	9.8	7.2	2.31	32.2%
3PAV:AP2:DORM	16.5	23.8	31.1	38.3	27.5	9.38	34.2%
4PAV:AP1:DORM	4.8	6.7	8.6	10.5	7.7	2.46	32.1%
4PAV:AP2:DORM	17.7	25.6	33.4	41.1	29.5	10.05	34.1%
5PAV:AP1:DORM	5.3	7.5	9.6	11.8	8.6	2.79	32.6%
5PAV:AP2:DORM	19.1	27.8	36.3	44.8	32.1	11.02	34.4%

Tratando-se dos graus hora de refrigeração em relação a variação dos coeficientes de descarga, apresentados na tabela 4.2, o percentual do desvio padrão em relação a médias dos valores simulados ainda é maior para os apartamentos voltados para leste (AP2). Porém esta variação diminui conforme a altura do pavimento. Isto é explicado pelo fato de que, com a ventilação natural, as temperaturas internas são condicionadas a se aproximar das temperaturas externas. Como a rotina de controle das aberturas permite apenas a ventilação quando a temperatura interna for maior que a externa, os ambientes mais quentes tendem a ter suas temperaturas mais próximas do exterior, o que diminui a variação entre diferentes casos.

Tabela 4.2 - Graus hora de refrigeração por coeficientes de descarga

GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO							
	CQ 0.40	CQ 0.60	CQ 0.80	CQ 1.00	Média	Desv. padrão	%
1PAV:AP1:DORM	1463	1203	1063	972	1133	214.09	18.9%
1PAV:AP2:DORM	1324	1131	1024	954	1078	161.21	15.0%
2PAV:AP1:DORM	1422	1186	1057	975	1122	195.22	17.4%
2PAV:AP2:DORM	1305	1128	1029	963	1079	148.64	13.8%
3PAV:AP1:DORM	1399	1175	1054	977	1115	184.17	16.5%
3PAV:AP2:DORM	1289	1122	1029	966	1076	140.50	13.1%
4PAV:AP1:DORM	1468	1241	1117	1039	1179	187.39	15.9%
4PAV:AP2:DORM	1338	1171	1076	1013	1124	141.48	12.6%
5PAV:AP1:DORM	2032	1766	1620	1526	1693	220.37	13.0%
5PAV:AP2:DORM	1864	1672	1561	1486	1617	164.21	10.2%

Também foram comparados os resultados das simulações de Coeficientes de Descargas de 0,60 (indicado como valor médio) com os resultados obtidos com as simulações adotando o valor *default* indicado pelo programa *EnergyPlus* de 1,00. Quanto as trocas de ar por hora, os valores para o *default* do *EnergyPlus* são aproximadamente 40% menores que os resultados com coeficiente de descarga 0,6. Para os graus hora de refrigeração o valor *default* resultou em valores 15% menores.

Analisando este comportamento pela figura 4.1, é possível observar que quanto maior o coeficiente de descarga, melhor é o desempenho térmico do ambien-

te. Considerando que o coeficiente de descarga é a taxa de fluxo de ar média que passa pelas aberturas, quanto mais ventilação, melhor é o desempenho térmico para o calor⁵.

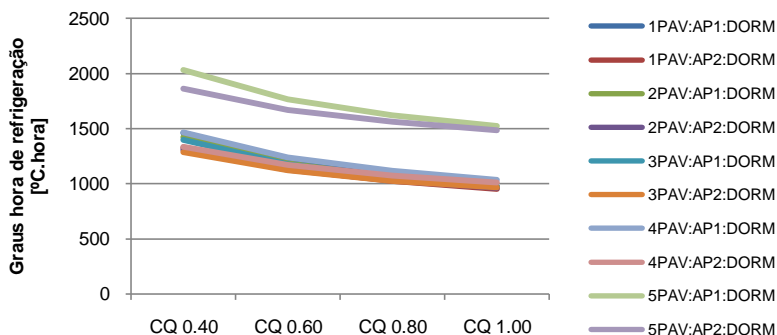


Figura 4.1 - Graus hora de refrigeração por coeficiente de descarga

É interessante observar que os desempenhos térmicos dos apartamentos das coberturas são piores que os intermediários, com graus hora de refrigeração aproximadamente 30% mais elevados. Os apartamentos de cobertura, encontrados no quinto pavimento, possuem mais áreas expostas para o ambiente externo.

Porém a constatação mais importante entre os percentuais de desvio padrão dos ACH e graus hora de refrigeração é o desvio menor para a análise de desempenho térmico do que para a análise de desempenho de ventilação. Por mais que a variação dos coeficientes de descarga possa acarretar um desvio de aproximadamente 30% de ACH, esta variação pode ser aproximadamente a metade disto para o desempenho térmico.

4.1.2. Coeficiente e expoente de frestas

Os coeficientes e expoentes de fluxo de massa de ar pelas frestas das portas e janelas quando fechadas, aqui chamados de coeficientes e expoentes de frestas, tiveram seus valores variados entre os máximos, médios e mínimos encontrados nas tabelas 3.3 e 3.4, adaptadas de Liddament (1986). Para as janelas dos dormitórios, salas e cozinha foram adotados os valores indicados para esquadrias de duas folhas de metal com deslizamento horizontal sem vedação, para as janelas dos banheiros os valores para esquadrias de metal do tipo pivotante com eixo horizontal superior com vedação, e para as portas os valores indicados para portas de madeira com uma folha pivotante sem vedação. Além destes valores também foram adotados os coeficientes

⁵ Isto permite afirmar que um edifício com janelas retangulares de cantos arredondados, que possuem coeficientes de descarga próximos a um, podem atribuir um melhor desempenho térmico do que aberturas obstruídas por venezianas ou brises, com 0,40 de coeficiente de descarga. Todavia, as condições de insolação alteram esta relação, pois estas simulações consideram a mesma abertura envidraçada com coeficiente de descarga diferentes, situação que não ocorre na prática.

e expoentes de frestas indicados pelos arquivos de exemplo do pacote de instalação do programa *EnergyPlus*.

Na tabela 4.3, a seguir, os percentuais de desvio padrão para a média dos valores de ACH médios são sempre menores que 1% para todos os casos, independente da orientação do apartamento ou da altura do pavimento. Porém, assim como ocorre em todos os conjuntos de simulações, os apartamentos voltados para leste sempre tem valores de ACH maiores que os voltados para oeste, assim como para os pavimentos superiores. Os apartamentos apresentam médias anuais de trocas de ar por hora diferentes entre si, porém a diferença devido a variação dos valores de coeficientes e expoentes de frestas são muito pequenas.

Tabela 4.3 - Médias anuais de ACH por coeficientes e expoentes de frestas

	MÉDIA ANUAL DE TROCAS DE AR POR HORA				Média	Desv. padrão	%
	default	máximo	médio	mínimo			
1PAV:AP1:DORM	7.4	7.4	7.4	7.3	7.4	0.02	0.3%
1PAV:AP2:DORM	27.5	27.4	27.3	27.3	27.4	0.10	0.4%
2PAV:AP1:DORM	8.9	8.9	8.8	8.8	8.9	0.05	0.6%
2PAV:AP2:DORM	34.4	34.2	34.3	34.2	34.2	0.09	0.3%
3PAV:AP1:DORM	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	0.06	0.6%
3PAV:AP2:DORM	38.3	38.1	38.0	38.0	38.0	0.14	0.4%
4PAV:AP1:DORM	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4	0.07	0.7%
4PAV:AP2:DORM	41.1	41.0	40.8	40.8	40.9	0.14	0.3%
5PAV:AP1:DORM	11.8	11.7	11.6	11.6	11.6	0.09	0.7%
5PAV:AP2:DORM	44.8	44.6	44.6	44.5	44.6	0.12	0.3%

Passando para a avaliação do desempenho térmico com os graus hora de refrigeração o percentual de desvio padrão para a média dos valores simulados é em torno de 3%, maiores que os encontrados para o desempenho de ventilação. Entretanto as variações não se alteram devido à orientação do apartamento ou a altura do pavimento. Isto indica, como era de se esperar, que os coeficientes e expoentes de frestas afetam o desempenho térmico dos ambientes apenas com infiltrações de ar indesejadas, condição que ocorre apenas quando as janelas estão fechadas, ou seja, quando as temperaturas internas estão abaixo das externas. Não afetando o desempenho de ambientes mais ou menos quentes⁶.

⁶ Com esta constatação tem-se a indicação que esquadrias com frestas mais estreitas, ou com vedação, que possuem coeficientes e expoentes de frestas menores, contribuem para um melhor desempenho térmico de edificações. Esquadrias que permitem muita infiltração podem afetar o desempenho do ambiente em até 4%. Porém deve-se considerar que estas simulações possuem um controle automático das aberturas, sendo que elas sempre estão fechadas para condições desfavoráveis de ventilação natural.

Tabela 4.4 - Graus hora de refrigeração por coeficientes e expoentes de frestas

	GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO					Desv. padrão	%
	default	máximo	médio	mínimo	Média		
1PAV:AP1:DORM	972	947	930	923	938	21.82	2.3%
1PAV:AP2:DORM	954	923	903	895	913	26.41	2.9%
2PAV:AP1:DORM	975	943	922	914	933	27.26	2.9%
2PAV:AP2:DORM	963	925	900	889	913	32.84	3.6%
3PAV:AP1:DORM	977	941	917	908	929	30.71	3.3%
3PAV:AP2:DORM	966	923	895	883	909	37.10	4.1%
4PAV:AP1:DORM	1039	999	974	964	987	33.35	3.4%
4PAV:AP2:DORM	1013	966	936	923	951	40.05	4.2%
5PAV:AP1:DORM	1526	1479	1449	1435	1464	40.40	2.8%
5PAV:AP2:DORM	1486	1432	1396	1380	1414	47.17	3.3%

Como nestas simulações varia-se apenas os coeficientes e expoentes de fresta, os valores *default* do *EnergyPlus* foram adotados para todos os outros parâmetros de ventilação. Por isso os resultados das variações de coeficientes e expoentes de frestas são próximos aos valores equivalentes ao coeficiente de descarga de 1,0 da análise anterior, valor *default* do *EnergyPlus*.

Comparando os valores médios de coeficientes e expoentes de frestas com o valores *default* do *EnergyPlus* tem-se que os valores médios resultam menores de trocas e ar por hora e de menos de 1% para graus hora de refrigeração.

Observando este comportamento pela figura 4.2 observa-se, pela baixa inclinação das linhas, como os valores de coeficientes e expoentes de frestas pouco afetam o desempenho térmico dos ambientes, mesmo para os apartamentos da cobertura, que apresentam pior desempenho.

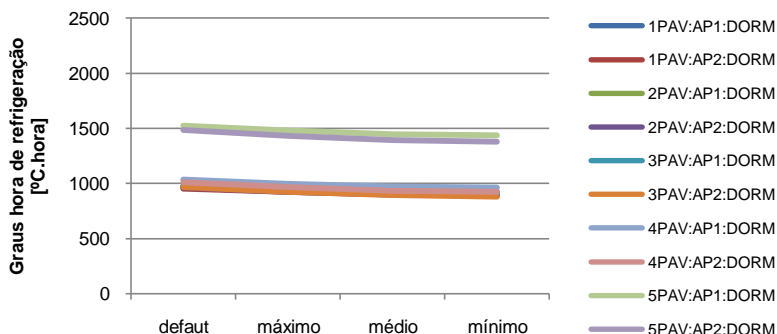


Figura 4.2 - Graus hora de refrigeração por coeficientes e expoentes de frestas

Para as frestas, pode-se concluir que as propriedades das aberturas quando fechadas afetam o desempenho térmico onde o clima torna indesejável a infiltração de ar quente. Porém quanto menor a diferença entre a temperatura máxima desejada e a temperatura externa, menor será a influência das frestas no desempenho térmico e de ventilação.

4.1.3. Rugosidade do entorno

A rugosidade do entorno foi um parâmetro variado que não afeta as configurações da edificação, porém pode ser determinante a partir do momento em que afeta as condições de vento sobre o edifício. Nas simulações este parâmetro é utilizado para a correção das velocidades do vento do arquivo climático para condições de vizinhança diferentes da estação onde foram tiradas as medidas pelo anemômetro. Foram adotados três valores de rugosidade do entorno (α): 0,14 para representar um campo aberto; 0,22 para um ambientes suburbano com edificações térreas; e 0,33 para um ambiente denso como centros urbanos.

O desempenho de ventilação, como apresenta a tabela 4.5, é bastante afetado pela diferença de rugosidade de entorno adotada. Quanto maior a rugosidade, menor os valores de médias anuais de ACH. Esta diferença é apontada pelo percentual de desvio padrão para a média dos valores simulados, que varia em torno de 30 a 50%. É possível observar que esta diferença é maior para os apartamentos nos pavimentos mais altos. Este comportamento já era esperado, pois a rugosidade entra como expoente da altura da edificação na correção da velocidade de vento do arquivo climático, como explicado na seção 3.3.4.

Tabela 4.5 - Médias anuais de ACH pela rugosidade do entorno

	MÉDIA ANUAL DE TROCAS DE AR POR HORA			Média	Desv. padrão	%
	Contry 0.14	Suburbs 0.22	City 0.33			
1PAV:AP1:DORM	11.0	7.4	4.6	7.4	3.17	43.0%
1PAV:AP2:DORM	43.2	27.5	15.1	27.5	14.08	51.2%
2PAV:AP1:DORM	12.5	8.9	5.8	8.9	3.35	37.4%
2PAV:AP2:DORM	50.0	34.4	20.7	34.4	14.67	42.6%
3PAV:AP1:DORM	13.4	9.8	6.6	9.8	3.38	34.4%
3PAV:AP2:DORM	53.6	38.3	24.1	38.3	14.73	38.5%
4PAV:AP1:DORM	14.1	10.5	7.2	10.5	3.42	32.5%
4PAV:AP2:DORM	56.1	41.1	26.8	41.1	14.64	35.6%
5PAV:AP1:DORM	15.4	11.8	8.3	11.8	3.54	30.1%
5PAV:AP2:DORM	59.9	44.8	29.9	44.8	14.97	33.4%

Entretanto, mesmo que a diferença média do desempenho de ventilação entre os valores de rugosidade simulados seja aproximadamente de 38%, esta diferença cai para em torno de 7% quando analisado o desempenho térmico. Mais uma vez, assim como observado para os coeficientes de descarga, a variação da rugosidade do entorno tem menos influência no desempenho térmico de graus hora de refrigeração do que quando observado os valores de trocas de ar por hora.

Tabela 4.6 - Graus hora de refrigeração pela rugosidade do entorno

	GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO					
	Contry 0.14	Suburbs 0.22	City 0.33	Média	Desv. padrão	%
1PAV:AP1:DORM	926	972	1138	972	111.10	11.4%
1PAV:AP2:DORM	929	954	1075	954	77.87	8.2%
2PAV:AP1:DORM	947	975	1095	975	78.48	8.0%
2PAV:AP2:DORM	953	963	1048	963	51.97	5.4%
3PAV:AP1:DORM	956	977	1071	977	61.45	6.3%
3PAV:AP2:DORM	962	966	1031	966	38.65	4.0%
4PAV:AP1:DORM	1012	1039	1136	1039	65.35	6.3%
4PAV:AP2:DORM	1004	1013	1079	1013	40.75	4.0%
5PAV:AP1:DORM	1440	1526	1717	1526	141.55	9.3%
5PAV:AP2:DORM	1422	1486	1638	1486	111.04	7.5%

Este comportamento observado na figura 4.3 ilustra as verificações de como a rugosidade do entorno afeta o desempenho térmico. Mesmo que este seja um parâmetro fácil de ser definido, conhecendo-se a situação da edificação analisada, sua definição é importante principalmente para avaliações de ambientes em pavimentos mais baixos.

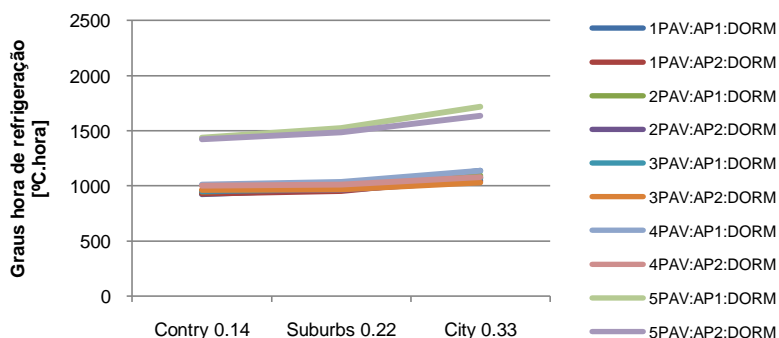


Figura 4.3 - Graus hora de refrigeração pela rugosidade do entorno

Os apartamentos da cobertura, mesmo com pior desempenho, apresentam comportamento similar aos apartamentos intermediários quanto a variação da rugosidade do entorno.

4.1.4. Coeficientes de Pressão

A análise da influencia dos CPs não permitiu a avaliação de valores máximos, médios e mínimos, pois estes coeficientes variam entre diferentes fontes. Para comparar os valores de cada fonte foi montada a tabela 4.7 com os CPs de vento normal a fachada onde se encontra a janela do ambiente analisado. Como as opções *LowRise* e *HighRise*, calculadas pelo *EnergyPlus*, resultam em coeficientes de pressão médios por orientação da fachada e pela equação considerar os valores de $CP=0,6$ para esta orientação, os valores dos CPs obtidos por estas fontes não foram

considerados nesta primeira tabela.

Conforme a tabela 4.7, cada fonte apresenta valores muito diferentes de CPs, com percentual de desvio padrão para a média de 114%. Os CPs são valores de difícil aquisição e mesmo para mesmas condições os valores obtidos variam muito de fonte para fonte.

Tabela 4.7 - Coeficiente de pressão normal a fachada por fonte

CP normal a fachada								
	LowRi- se	HighRi- se	CP Calc	TNO Cp Generator	Tokio Database	Média	Desv. padrão	%
1PAV:AP1:DORM	-	-	-0.0010	0.2310	0.4952	0.231	0.25	107.5%
1PAV:AP2:DORM	-	-	0.3010	0.3620	0.6022	0.362	0.16	44.0%
2PAV:AP1:DORM	-	-	0.2930	0.3140	0.6056	0.314	0.17	55.7%
2PAV:AP2:DORM	-	-	-0.2550	0.4670	0.7930	0.467	0.54	114.8%
3PAV:AP1:DORM	-	-	0.0940	0.4290	0.7351	0.429	0.32	74.7%
3PAV:AP2:DORM	-	-	0.0940	0.4290	0.7351	0.429	0.32	74.7%
4PAV:AP1:DORM	-	-	-0.2550	0.4670	0.7930	0.467	0.54	114.8%
4PAV:AP2:DORM	-	-	0.2930	0.3140	0.6056	0.314	0.17	55.7%
5PAV:AP1:DORM	-	-	0.3010	0.3620	0.6022	0.362	0.16	44.0%
5PAV:AP2:DORM	-	-	-0.0010	0.2310	0.4952	0.231	0.25	107.5%

Porém estas grandes diferenças de CPs resultam em menores diferenças para o desempenho de ventilação natural. Para as diferentes fontes de CP, agora considerando os CPs calculados pelo *EnergyPlus*, o percentual de desvio padrão para a média simulada de ACH é de aproximadamente 29% em média. No entanto este percentual pode ser de até 122.4% em alguns casos extremos, principalmente devido aos coeficientes de pressão provenientes do CP Calc. Se forem desconsiderados os resultados de ACH com os valores de CP calculados pelo CP Calc as diferenças apresentadas entre as fontes diminui e os percentuais de desvios padrão para a média fica em torno de 17%, com valores máximos de 26%.

Tabela 4.8 - Médias anuais de ACH por fonte de coeficiente de pressão

MÉDIA ANUAL DE TROCAS DE AR POR HORA								
	LowRise	HighRise	CP Calc	TNO Cp Generator	Tokio Data- base	Média	Desv. padrão	%
1PAV:AP1:DORM	7.4	6.1	6.1	3.2	2.2	6.1	2.19	35.8%
1PAV:AP2:DORM	27.5	25.7	25.7	28.3	30.7	27.5	2.06	7.5%
2PAV:AP1:DORM	8.9	7.0	7.0	1.7	0.4	7.0	4.00	57.1%
2PAV:AP2:DORM	34.4	31.9	31.9	32.4	34.4	32.4	1.30	4.0%
3PAV:AP1:DORM	9.8	7.6	7.6	1.0	1.9	7.6	5.00	66.1%
3PAV:AP2:DORM	38.3	35.4	35.4	39.2	40.3	38.3	2.24	5.8%
4PAV:AP1:DORM	10.5	8.0	8.0	7.2	10.5	8.0	9.80	122.4%
4PAV:AP2:DORM	41.1	37.8	37.8	37.9	38.7	37.9	1.40	3.7%
5PAV:AP1:DORM	11.8	8.9	8.9	0.0	3.5	8.9	6.58	73.6%
5PAV:AP2:DORM	44.8	41.1	41.1	43.1	45.0	43.1	1.92	4.5%

Entretanto, estes desvios consideráveis de CPs ou ACH pouco influenciam nas diferenças de desempenho térmico encontradas entre as simulações feitas com as diferentes fontes de CPs, apresentadas na tabela 4.9. É importante ressaltar que

mesmo com coeficientes de pressão tão diferentes, por estas simulações, o que mais interfere no desempenho térmico do edifício são os coeficientes de descarga e o perfil de vento definido pelo arquivo climático e a rugosidade do entorno.

Tabela 4.9 - Graus hora de refrigeração por fonte de coeficiente de pressão

	GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO					Média	Desv. padrão	%
	LowRise	HighRise	CP Calc	TNO Cp Generator	Tokio Database			
1PAV:AP1:DORM	972	990	983	958	955	972	15.16	1.6%
1PAV:AP2:DORM	954	966	996	975	964	966	15.81	1.6%
2PAV:AP1:DORM	975	994	938	951	954	954	22.21	2.3%
2PAV:AP2:DORM	963	973	987	972	964	972	9.50	1.0%
3PAV:AP1:DORM	977	996	934	949	954	954	24.47	2.6%
3PAV:AP2:DORM	966	975	980	969	970	970	5.26	0.5%
4PAV:AP1:DORM	1039	1061	1003	1008	1019	1019	23.70	2.3%
4PAV:AP2:DORM	1013	1021	1024	1015	1018	1018	4.55	0.4%
5PAV:AP1:DORM	1526	1559	1507	1490	1532	1526	26.10	1.7%
5PAV:AP2:DORM	1486	1498	1531	1491	1497	1497	17.71	1.2%

A simulação feita com os CPs calculados pelo método *LowRise* do *Energy-Plus* foi considerado como *default*. Por esta razão os resultados *default* das análises anteriores apresentam os mesmos valores. Para os graus hora de refrigeração as diferenças entre os resultados das diferentes fontes de CPs são sempre menores que 3% em relação aos resultados da fonte *default* (*LowRise*). Graficamente é possível observar esta baixa influência, de no máximo 3%, pela baixa inclinação das linhas do Figura 4.4.

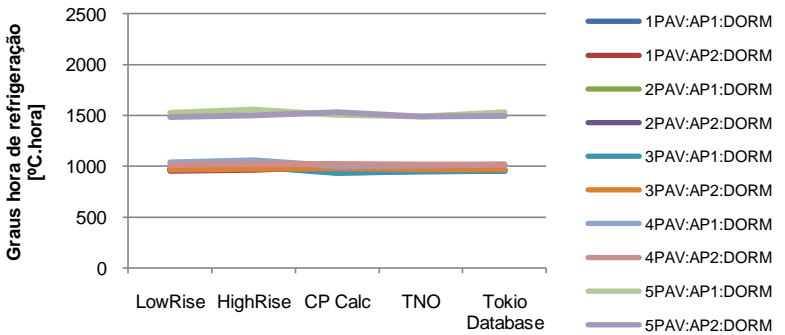


Figura 4.4 - Graus hora de refrigeração por fonte de coeficiente de pressão

4.1.5. Casos de parâmetros extremos

A partir destas simulações foram selecionados os parâmetros que resultaram nos melhores e piores desempenhos de cada conjunto. Esses parâmetros foram utilizados para modelar dois casos extremos: pior caso, com os parâmetros que resultaram nos piores desempenhos (maiores números de graus hora de refrigeração); melhor caso, com os parâmetros que resultaram nos melhores desempenhos

(menores números de graus hora de refrigeração. Assim, os dois casos foram modelados com os seguintes parâmetros de ventilação:

Tabela 4.10 – Parâmetros de ventilação adotados nos casos extremos

CASO	PARÂMETROS DE VENTILAÇÃO
Pior	Coefficiente de pressão: highrise Coefficiente de Descarga: 0,40 FRESTAS: <i>default</i> Rugosidade do entorno: 0,33 (city)
Melhor	Coefficiente de pressão: Tokio Database Coefficiente de Descarga: 1,00 Frestas: mínimo Rugosidade do entorno: 0,14 (country)

Conforme tabela 4.11, para os dois casos extremos as diferenças de desempenho térmico apresentadas entre o melhor e pior caso é de aproximadamente a metade das diferenças observadas para as médias anuais de trocas de ar por hora (ACH). O desvio padrão entre as diferenças é de 10% para as médias anuais de ACH e 5% para as diferenças entre graus hora de refrigeração.

Tabela 4.11 – Comparação entre melhor e pior caso

	Médias anuais de ACH		Diferença %	GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO		Diferença %
	Pior	Melhor		Pior	Melhor	
1PAV:AP1:DORM	3.1	2.3	73.5%	1944	827	42.5%
1PAV:AP2:DORM	9.9	8.7	88.4%	1705	836	49.0%
2PAV:AP1:DORM	3.9	2.7	69.0%	1801	829	46.0%
2PAV:AP2:DORM	13.5	11.8	87.9%	1594	836	52.4%
3PAV:AP1:DORM	4.4	3.0	67.4%	1719	828	48.2%
3PAV:AP2:DORM	15.6	13.7	87.7%	1526	837	54.8%
4PAV:AP1:DORM	4.8	3.2	66.5%	1788	880	49.2%
4PAV:AP2:DORM	17.3	15.2	87.7%	1566	871	55.6%
5PAV:AP1:DORM	5.4	3.6	66.4%	2502	1307	52.2%
5PAV:AP2:DORM	19.2	16.8	87.4%	2217	1273	57.4%

No desempenho de ventilação natural as diferenças entre os apartamentos leste e oeste são em torno de 17% e quanto maior a altura do pavimento menor é a diferença entre os melhores e piores casos. Porém este comportamento se inverte para os resultados de graus hora de refrigeração. Mesmo com os apartamentos leste apresentando uma diferença de 5% maior que os apartamentos voltados pra oeste a diferença entre os piores e melhores casos aumenta conforme a altura do pavimento.

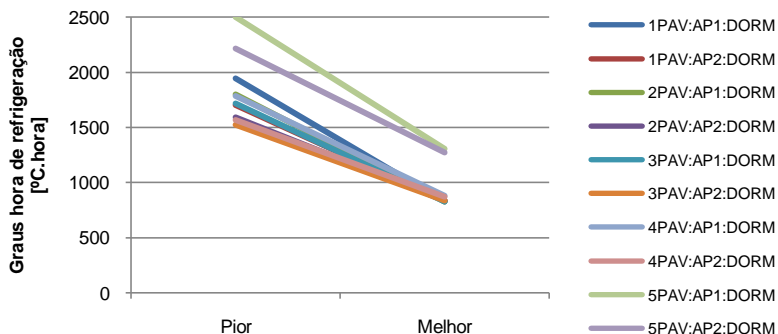


Figura 4.5 - Graus hora de refrigeração para o melhor e pior caso

Na figura 4.5 é possível identificar ainda como a diferença de desempenho entre os pavimentos é menor para os casos de melhor desempenho térmico. Isto ocorre porque, com a ventilação natural, a rotina de controle das aberturas permite apenas a ventilação quando a temperatura interna for maior que a externa, os ambientes melhor ventilados tendem a ter suas temperaturas no limite possível permitido pelo envoltório, pois a ventilação contribui para as perdas das cargas térmicas, o que diminui a diferença entre os pavimentos.

4.1.6. Influência dos parâmetros de ventilação

Para comparação entre a influência da variação dos parâmetros de ventilação adotados nos conjuntos de simulação foi desenvolvida a Figura 4.6, que apresenta a dispersão entre valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros de ventilação pela variação de graus hora de refrigeração. Trata-se de um gráfico do tipo aranha que possui os dois eixos relativos. O eixo das abscissas indica os valores máximos, médios e mínimos de cada parâmetro de ventilação. O eixo das ordenadas representa a variação de graus horas de refrigeração entre o valor médio para os máximos ou mínimos valores das abscissas. Para a elaboração deste gráfico foram utilizados os dados referentes aos valores médios dos dormitórios dos apartamentos do terceiro pavimento.

Este gráfico permite visualizar quais parâmetros mais influenciam no desempenho térmico dos ambientes. Os coeficientes de descarga, representados pela linha vermelha, são os valores que mais influenciam nos graus hora de refrigeração, variando até 170°C.hora no desempenho final do ambiente. E o coeficiente de pressão, linha verde que apresenta a menor inclinação, é o parâmetro que menos impactou o desempenho térmico dos ambientes.

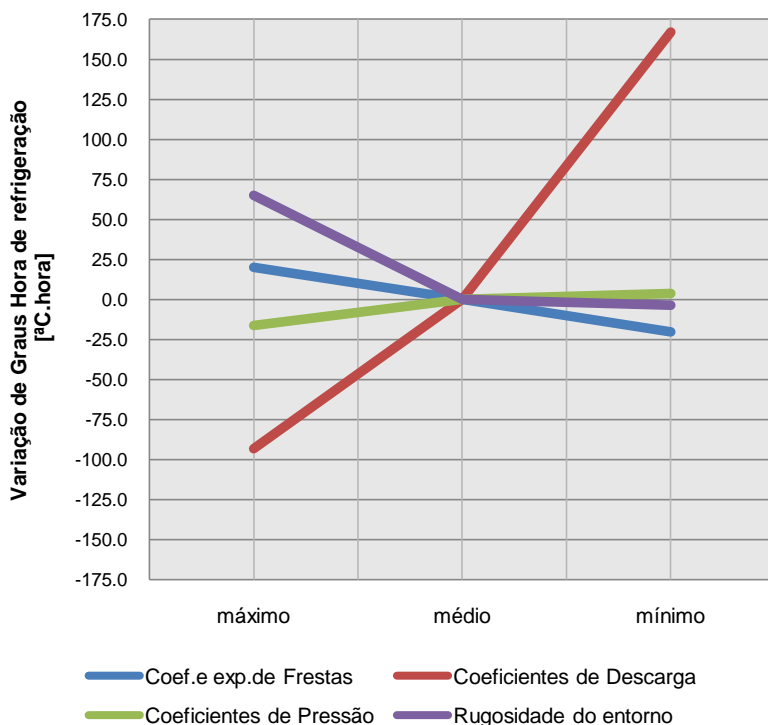


Figura 4.6 – Influência da variação dos parâmetros no desempenho térmico

Também é possível observar, com a direção da inclinação da linha, se a variação do parâmetro é direta ou inversamente proporcional ao desempenho térmico dos ambientes. Quanto maior o coeficiente e expoente de frestas, maior é sua influência no desempenho. Quanto menor o coeficiente de descarga, menor é o desempenho.

Reunindo os resultados de porcentagem do desvio padrão para a média dos resultados simulados na tabela é possível analisar a influência de cada parâmetro no desempenho térmico do edifício.

Tabela 4.12 – Porcentagem de desvio padrão para a média

	GRAUS HORA DE REFRIGERAÇÃO			
	Coeficiente de Descarga	Coeficientes e expoentes de frestas	Rugosidade do Entorno	Coeficientes de Pressão
1PAV:AP1:DORM	18.9%	2.3%	11.4%	1.6%
1PAV:AP2:DORM	15.0%	2.9%	8.2%	1.6%
2PAV:AP1:DORM	17.4%	2.9%	8.0%	2.3%
2PAV:AP2:DORM	13.8%	3.6%	5.4%	1.0%
3PAV:AP1:DORM	16.5%	3.3%	6.3%	2.6%
3PAV:AP2:DORM	13.1%	4.1%	4.0%	0.5%
4PAV:AP1:DORM	15.9%	3.4%	6.3%	2.3%
4PAV:AP2:DORM	12.6%	4.2%	4.0%	0.4%
5PAV:AP1:DORM	13.0%	2.8%	9.3%	1.7%
5PAV:AP2:DORM	10.2%	3.3%	7.5%	1.2%

A influência varia pouco conforme a altura do pavimento, sendo esta diferença entre alturas mais observada para o coeficiente de descarga e para a rugosidade do entorno. Porém, a maior influência é dada pelo coeficiente de descarga, seguidos da rugosidade do entorno e coeficientes e expoentes de frestas, sendo a menor influência decorrida dos coeficientes de pressão.

4.2. Modelo Real

Primeiramente foi avaliada a influência da adoção de parâmetros de ventilação natural diferentes com uma simulação padrão, considerando os parâmetros default do *EnergyPlus*, e uma simulação avançada, com parâmetros derivados de fontes específicas. Definida a influência, foi avaliado o desempenho térmico do modelo real de um edifício vertical multifamiliar da cidade de Campo Grande, MS.

O modelo, composto por 540 zonas térmicas, resultou num arquivo de entrada (IDF) com cerca de 10 Megabytes. Cada simulação demorou em torno de 170 horas, com um grande número de dados de saídas a serem tratados para avaliação. Os relatórios resultantes da simulação foram utilizados nas duas análises a seguir.

4.2.1. Influência dos parâmetros de ventilação

Os resultados das simulações do modelo real com os parâmetros de ventilação padrão e avançados foram sintetizados em tabelas e gráficos comparativos. Foram comparados os resultados de graus hora de refrigeração dos ambientes de permanência prolongada (sala e dormitórios) do primeiro pavimento, sexto pavimento e pavimento da cobertura. Os gráficos na figura 4.7 apresentam os resultados de graus hora de refrigeração para cada ambiente dos pavimento analisados. Cada coluna representa um tipo de simulação, padrão ou avançada, e com eles é possível ter as primeiras impressões da diferença de comportamento entre os modelos simulados.

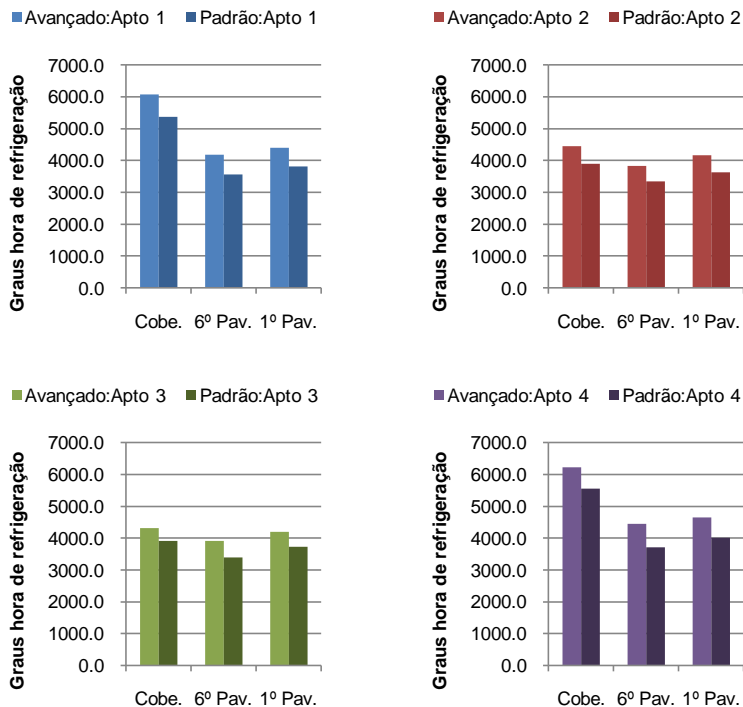


Figura 4.7. Graus hora de refrigeração padrão e avançado para cada ambiente

A tabela 4.13 apresenta todos os resultados de graus hora tratados para a análise. Os maiores e menores valores encontrados para cada ambiente nas duas simulações foram destacados com um retângulo. Os destaques permitem observar o comportamento dos valores para as colunas das simulações avançadas em relação à coluna das simulações padrão.

Tabela 4.13. Graus Hora de refrigeração da simulação avançada e padrão

		SIMULAÇÃO AVANÇADA				SIMULAÇÃO PADRÃO			
		Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4	Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4
Sala	Cob.	6066	4456	4318	6219	5372	3901	3911	5556
	6º Pav.	4185	3825	3917	4453	3558	3341	3395	3709
	1º Pav.	4405	4169	4199	4647	3819	3628	3733	4013
Dorm1	Cob.	3646	2458	2313	3551	3586	2386	2400	3599
	6º Pav.	3316	2238	2209	3402	3247	2214	2282	3257
	1º Pav.	3871	2689	2678	3933	3567	2428	2496	3626
Dorm2	Cob.	3995	2949	2607	3625	3864	2787	2800	3815
	6º Pav.	4012	2848	2540	3668	3753	2732	2771	3736
	1º Pav.	4675	3169	2942	4154	4031	2972	3064	4087
Dorm3	Cobe.	4371	4625	4092	3323	3812	4034	4308	3438
	6º Pav.	4662	4535	3920	3598	3853	3984	4207	3555
	1º Pav.	5218	4997	4453	4051	4144	4287	4596	3962

Os maiores valores coincidem para os ambientes da sala e dormitório 1. Os menores valores coincidem para a sala e dormitório 3. Porém os maiores e menores valores que não concordam em apartamento, coincidem em orientação norte e sul, combinando apartamentos 2 com 3, e 1 com 4.

A observação dos desempenhos entre as simulações indica o comportamento similar simulados com os parâmetros padrão ou avançados. Porém, para avaliar a grandeza da desigualdade entre as simulações foram calculadas as diferenças entre os resultados das simulações padrão e avançada para cada ambiente, dispostas na tabela 4.14, a seguir.

Tabela 4.14. Diferença de graus hora de refrigeração avançado e padrão

		DIFERENÇA ENTRE AMBIENTES			
		Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4
Sala	Cob.	11%	12%	9%	11%
	6º Pav.	15%	13%	13%	17%
	1º Pav.	13%	13%	11%	14%
Dorm1	Cob.	2%	3%	4%	1%
	6º Pav.	2%	1%	3%	4%
	1º Pav.	8%	10%	7%	8%
Dorm2	Cob.	3%	5%	7%	5%
	6º Pav.	6%	4%	9%	2%
	1º Pav.	14%	6%	4%	2%
Dorm3	Cobe.	13%	13%	5%	3%
	6º Pav.	17%	12%	7%	1%
	1º Pav.	21%	14%	3%	2%

A média das diferenças é de 8%, sendo que uma diferença máxima de 21% se deu apenas para o dormitório 3 do primeiro pavimento. A maior média de diferenças ocorreu no ambiente da sala, com média de 13% de diferença entre a simulação avançada e padrão. Os dormitórios 1 e 2 apresentaram as menores diferenças médias, entre 4% e 6%. Entre os apartamentos, a maior diferença ocorreu para os Apartamentos 1, com média de 10% de diferença para seus ambientes. Seguido pela diferença de 9% para os apartamentos 2, de 7% para os apartamentos 3 e 6% para os

apartamentos 4.

4.2.2. Desempenho térmico do edifício

Com os resultados simulados de graus hora de refrigeração dos ambientes foram determinados seus níveis de desempenho térmico. Foi adotada uma escala de graus hora a partir de um valor de referência de graus hora de refrigeração da temperatura do ar externo, conforme tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Escala Graus hora de refrigeração para classificação

A	B	C	D	E
$X < 2248$	$2248 > X < 4497$	$4497 > X < 6746$	$6746 > X < 8995$	$X > 8995$

A tabela 4.16 apresenta os resultados de graus hora de refrigeração obtidos para cada ambiente. Cada célula foi formatada conforme a escala de cores referente à classificação do nível de desempenho térmico do ambiente. A tabela apresenta a diversidade de desempenhos encontrada no edifício, tanto em relação ao pavimento, quando a orientação dos ambientes. Os ambientes de melhor desempenho foram os dormitórios 1 e 2 dos três pavimentos analisados. As salas da cobertura possuem os maiores valores de graus hora, indicando os piores desempenhos entre os ambientes do edifício. Os dormitórios dos apartamentos da coluna 4, voltados para noroeste, apresentaram melhor desempenho que os dormitórios da coluna 1, nordeste.

Tabela 4.16. Graus hora de refrigeração por ambiente com escala de desempenho

		SIMULAÇÃO AVANÇADA						SIMULAÇÃO PADRÃO			
		Área	Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4	Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4	
Cobertura	Sala	24.15	6066	4456	4318	6219	5372	3901	3911	5556	
	Dorm1	9.29	3646	2458	2313	3551	3586	2386	2400	3599	
	Dorm2	11.73	3995	2949	2607	3625	3864	2787	2800	3815	
	Dorm3	10.00	4371	4625	4092	3323	3812	4034	4308	3438	
6º Pav.	Sala	24.15	4185	3825	3917	4453	3558	3341	3395	3709	
	Dorm1	9.29	3316	2238	2209	3402	3247	2214	2282	3257	
	Dorm2	11.73	4012	2848	2540	3668	3753	2732	2771	3736	
	Dorm3	10.00	4662	4535	3920	3598	3853	3984	4207	3555	
1º Pav.	Sala	24.15	4405	4169	4199	4647	3819	3628	3733	4013	
	Dorm1	9.29	3871	2689	2678	3933	3567	2428	2496	3626	
	Dorm2	11.73	4675	3169	2942	4154	4031	2972	3064	4087	
	Dorm3	10.00	5218	4997	4453	4051	4144	4287	4596	3962	

Entretanto, para se obter o nível de desempenho térmico geral de cada apartamento foram calculadas as médias ponderadas dos graus hora de refrigeração pela área do ambiente. Os graus hora de refrigeração ponderados são apresentados na tabela 4.17, com os valores referentes aos apartamentos. As células desta tabela foram formatadas com a cor referente ao nível de desempenho térmico do apartamento.

Tabela 4.17. Média dos graus hora dos ambientes por apartamento

	SIMULAÇÃO AVANÇADA				SIMULAÇÃO PADRÃO			
	Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4	Apto 1	Apto 2	Apto 3	Apto 4
Cobertura	4911	3761	3557	4360	4356	3346	3522	4163
6º Pav.	4088	3517	3412	3767	3696	3144	3367	3621
1º Pav.	4032	3493	3413	3743	3619	3123	3359	3560

Mesmo com as diferenças de desempenho apresentada pelos ambientes, a ponderação dos resultados para cada apartamento resultou em um nível igual para quase todas as unidades habitacionais. Com exceção do apartamento 1 (nordeste) do pavimento de cobertura, a média de desempenho de todos os apartamentos analisados foram classificados como “B”, considerando a escala adotada.

A figura 4.1, apresenta as plantas dos pavimentos analisados com os ambientes *hachurados* nas cores de seu nível de desempenho térmico. A figura apresenta o comportamento do edifício quando a seu desempenho entre os níveis e orientações. Não é possível identificar a grandeza do desempenho de cada ambiente, considerando que a faixa de abrangência de graus hora para cada nível pode beneficiar ou prejudicar seu real desempenho. Porém é possível observar o desempenho médio dos pavimentos.

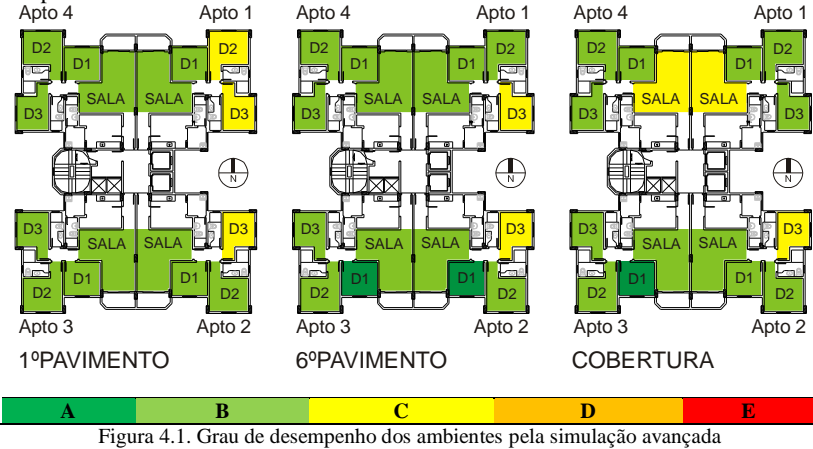


Figura 4.1. Grau de desempenho dos ambientes pela simulação avançada

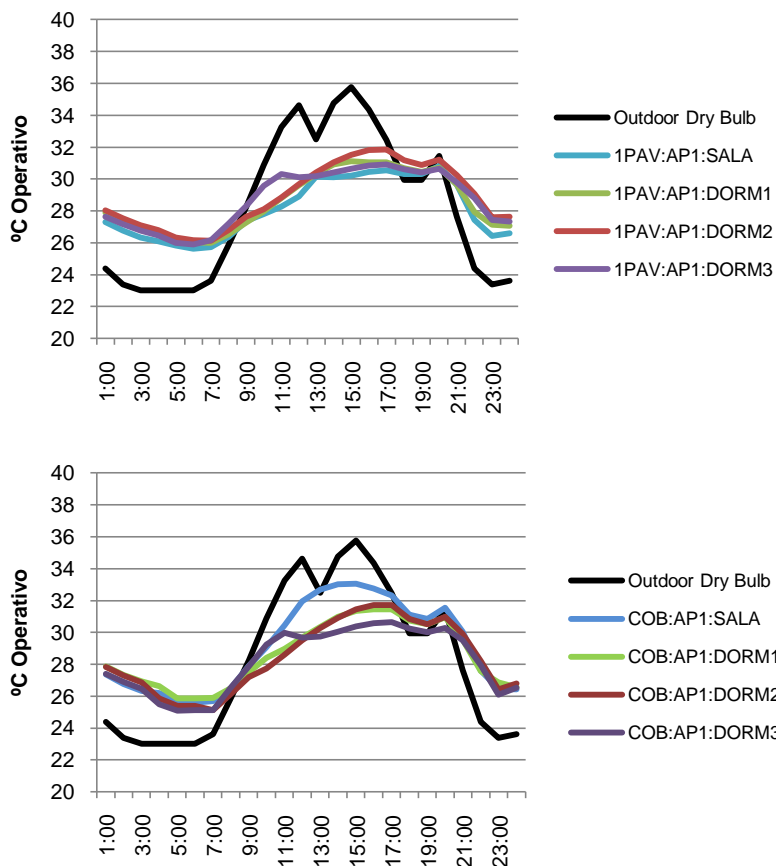
Para determinar o desempenho térmico do edifício completo foi feita a média do desempenho dos apartamentos. Como são 12 pavimentos, para se obter uma média ponderada do edifício, o desempenho do pavimento intermediário foi considerado para todos os outros pavimentos entre a cobertura e o primeiro pavimento. Para ponderação foi considerado a média de graus hora dos apartamentos da cobertura, a média de graus hora do primeiro pavimento e dez vezes a média de graus hora do pavimento intermediário. Esta média de desempenho do edifício completo resultou em 3731,9 graus hora de refrigeração para a simulação avançada e 3486,3 para a simulação padrão. Assim, ambos os resultados indicam um nível de desempenho “B” para o edifício.

4.2.3. Avaliação do comportamento do modelo real

A duas análises anteriores dos resultados do modelo real devem ser corroboradas com uma terceira análise, a avaliação do comportamento do modelo. Como a simulação do modelo real resultou numa quantidade de dados muito grande, foram selecionados para esta análise apenas os apartamentos 1 do primeiro pavimento e cobertura. A análise destas duas unidades habitacionais tem a intenção de avaliar o comportamento de um apartamento em diferentes alturas, não tendo a pretensão de representar todo o edifício. As análises foram feitas para o dia mais quente, mais frio e mais e menos ventoso do arquivo climático, também foi selecionado um dia com distribuições normais de temperatura do ar externo.

Os gráficos das figuras 4.8 e 4.9 apresentam o comportamento dos ambientes dos apartamentos 1 do primeiro pavimento e cobertura para o dia mais quente do arquivo climático, 17 de setembro. Este dia apresenta amplitude térmica de aproximadamente 13°C. É possível observar o funcionamento do controle das aberturas de ventilação natural configurado para manter a temperatura interna menor que a externa e maior que 20°C. Os graus hora de refrigeração são calculados para temperaturas maiores que 26°C, observa-se como num dia quente a temperatura interna fica mais baixa que a temperatura externa, quando esta se eleva durante o dia, não sendo possível manter esta temperatura abaixo de 26°C.

17 de Setembro – Dia mais quente

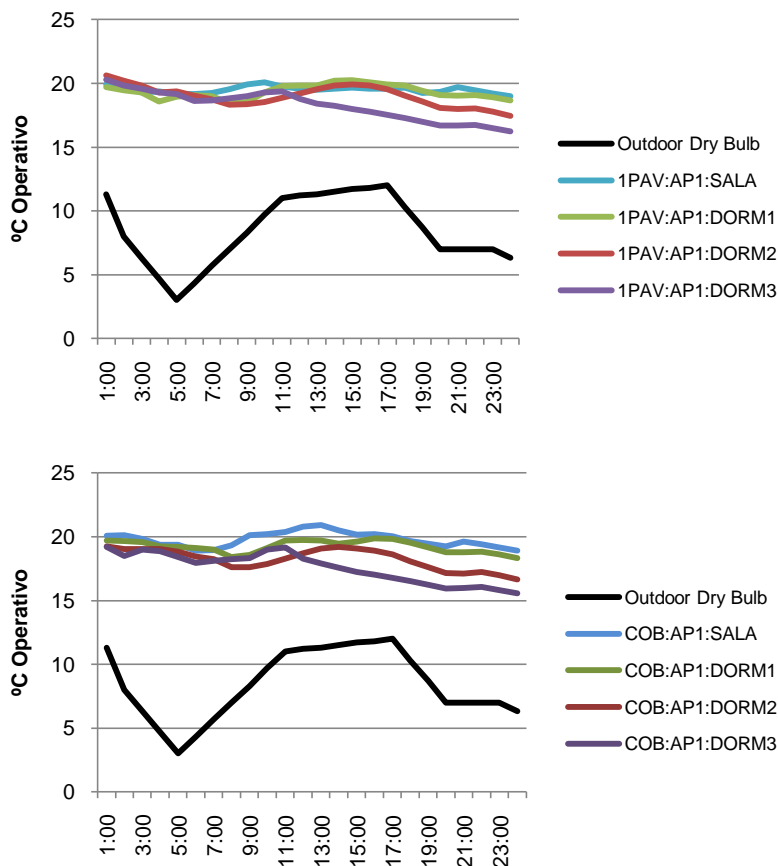


Figuras 4.8 e 4.9. Temperaturas do dia mais quente. 1º Pav. e Cob.

Nesta condição de dia mais quente as temperaturas dos ambientes da cobertura são maiores que as temperaturas do primeiro pavimento principalmente na sala. Os ganhos de calor pela área da cobertura e a infiltração de ar pelas frestas da porta janela deste ambiente contribuíram para suas maiores temperaturas.

Os gráficos das figuras 4.10 e 4.11 apresentam os resultados para o dia mais frio do arquivo climático, dia 17 de maio. A temperatura externa se mantém abaixo de 12°, com mínima de 3°C na madrugada. Porém, o controle de ventilação natural mantém a temperatura interna próxima de 20°C, pois esta configurado para manter as janelas fechadas abaixo desta temperatura. Esta situação representaria os valores de graus hora de aquecimento, entretanto este valor não foi considerado para as análises deste trabalho, pois representa dias muito atípicos para o clima de Campo Grande.

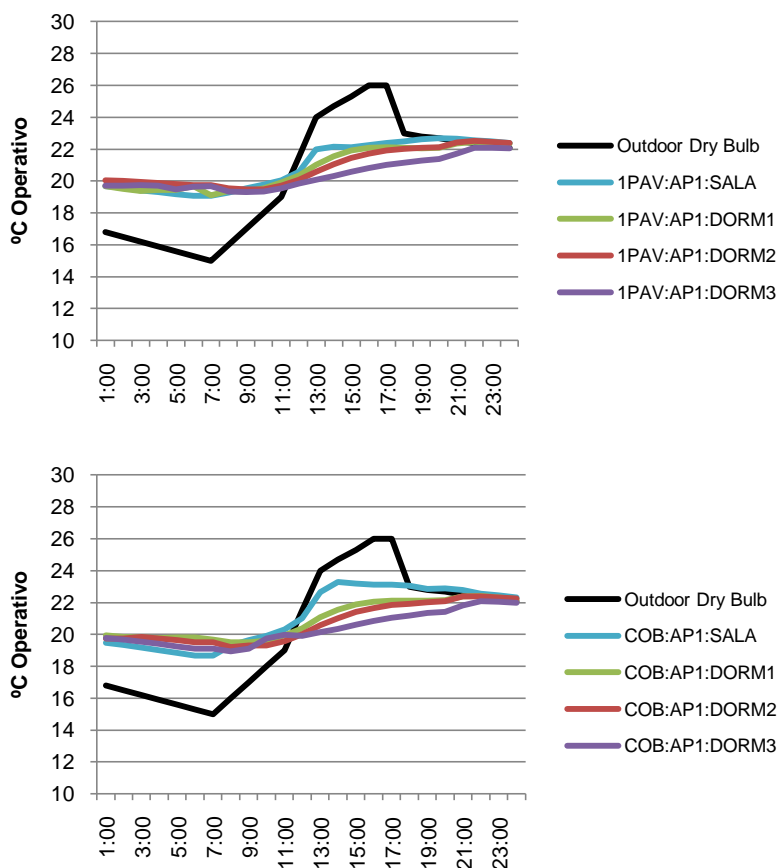
17/Maio – Dia mais frio



Figuras 4.10 e 4.11. Temperaturas do dia mais frio. 1º Pav. e Cob.

Os gráficos das figuras 4.12 e 4.13 apresentam as temperaturas internas dos ambientes do apartamento 1 do primeiro pavimento e cobertura para o dia mais ventoso, em 24 de julho. Neste dia a temperatura de bulbo seco do arquivo climático varia de 15 a 26°C e a velocidade do vento varia entre 8 e 14m/s. Enquanto a temperatura externa é menor que 20°C as temperaturas internas se mantêm a esta temperatura. Quando a temperatura do ar se eleva, as temperaturas internas se mantêm abaixo dela e conseqüentemente abaixo de 26°C. As diferenças de temperatura entre os ambientes da cobertura e primeiro pavimento são apenas notadas para a sala, que deve sofrer influência da maior área de cobertura e grande abertura da porta janela da sacada.

 24/07 - Dia com mais vento

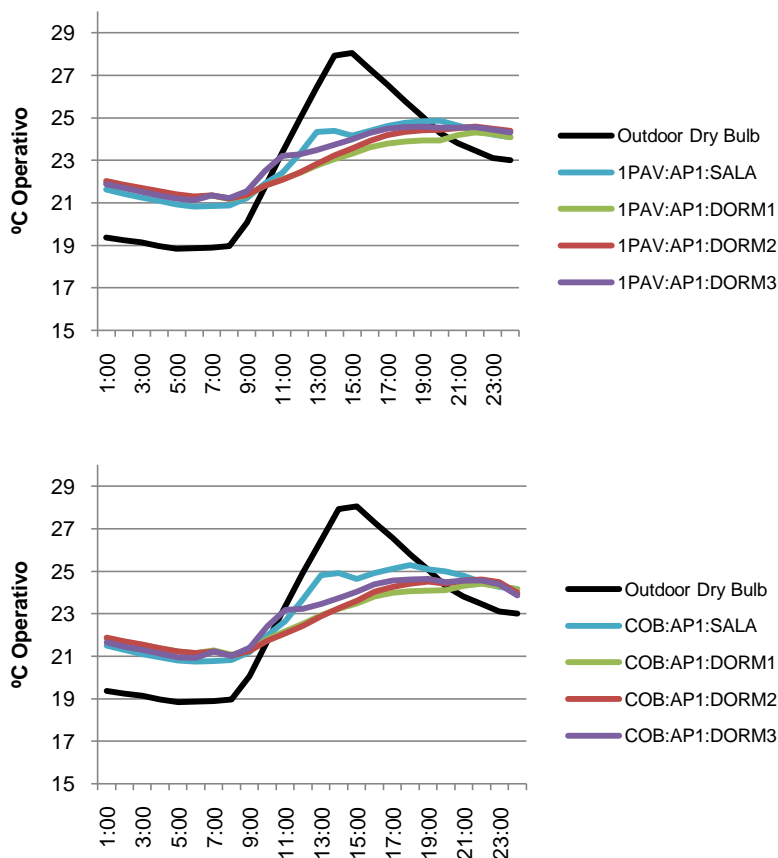


 Figuras 4.12 e 4.13. Temperaturas do dia com mais vento. 1º Pav. e Cob.

Nos gráficos das figuras 4.14 e 4.15, que apresenta as temperaturas para o dia menos ventoso, 02 de fevereiro, o comportamento é similar, com as temperaturas mantendo-se a 20°C quando a temperatura externa é menor que isto, e se mantendo menor que a externa quando esta se eleva. A sala também é o ambiente que apresenta maior diferença entre o primeiro pavimento e cobertura.

No dia menos ventoso a temperatura do arquivo climático variou entre 19°C e 28°C e a velocidade do vento se manteve abaixo de 3m/s. Porém a intensidade do vento para os dias com mais e menos vento não influenciou no desempenho térmico dos ambientes, pois as temperaturas internas se mantiveram abaixo de 26°C em ambos os casos, não registrando valores de graus hora de refrigeração.

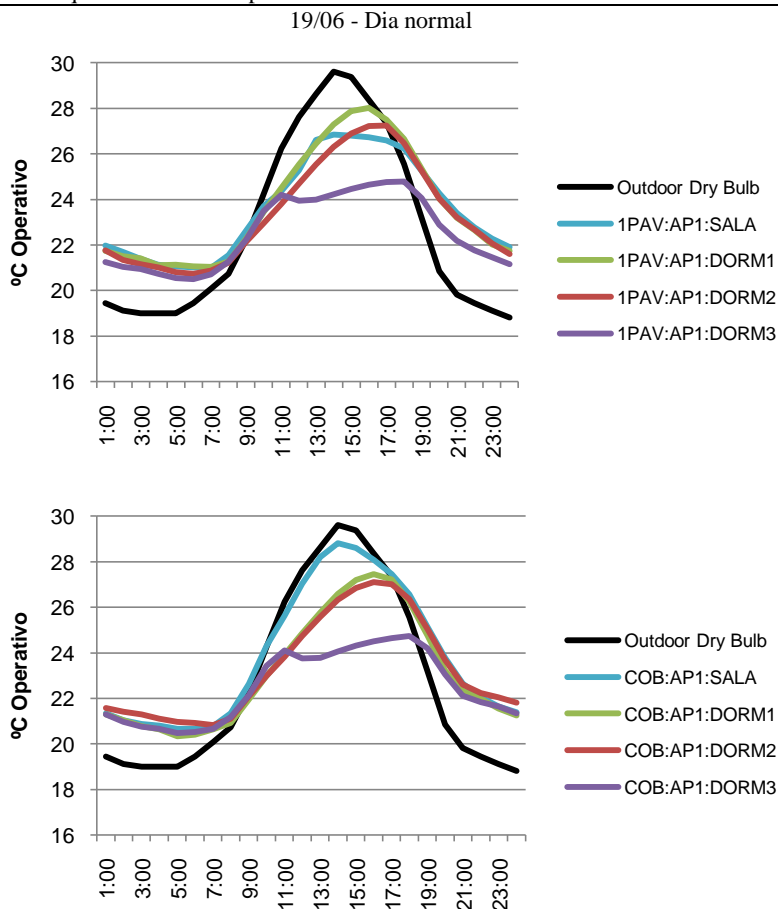
02/02 - Dia com menos vento



Figuras 4.14 e 4.15. Temperaturas do dia com menos vento. 1º Pav. e Cob.

Os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 apresentam os valores de temperatura de um dia com distribuições normais de temperaturas do ar externo. Neste dia a temperatura do ar externo varia entre 19 e 30°C, com amplitude térmica de aproximadamente 11°C. Nestes gráficos observa-se claramente como as temperaturas dos ambientes se aproximam quando as janelas estão abertas permitindo a ventilação natural, isto ocorre quando a temperatura do ar externo é menor que a temperatura do ambiente, ou seja, de manhã entre as 0:00 e 9:00 horas e no fim da tarde aproximadamente entre as 17:00 e 24:00 horas. Quando o controle de ventilação fecha as janelas pelo fato da temperatura interna estar mais baixa que a externa, as temperaturas de cada cômodo se mantiveram distintas de acordo com seus próprios ganhos térmicos. O dormitório 3 apresenta temperaturas abaixo das estimadas para os outros ambientes pois é o único com janela orientada para leste, recebendo menos carga solar que

os outros que estão voltados para norte num dia de baixa altitude solar.



Figuras 4.16 e 4.17. Temperaturas de um dia normal. 1º Pav. e Cob.

Estas análises do comportamento de dois apartamentos do edifício permitiram verificar o funcionamento do controle de ventilação natural simulado. O sistema funcionou para os dias extremos selecionados indicando o funcionamento de todo o edifício para todo o ano, já que todos os apartamentos foram modelados com os mesmos padrões.

5. CONCLUSÕES

O objetivo de avaliar o desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares naturalmente ventilados na cidade de Campo Grande direcionou ao estudo dos fundamentos teóricos de ventilação natural, suas variáveis e métodos de avaliação. Tomado como primeiro objetivo específico, o esclarecimento dos parâmetros de ventilação natural adotados em simulações com *EnergyPlus* foi a base para as análises e discussões dos resultados de simulações de desempenho do edifício.

Com a análise da variação dos parâmetros de ventilação pôde-se observar as influências significativas nos resultados de simulações de taxas de ventilação, porém com influências bem menores se tratando do desempenho térmico de graus hora de refrigeração. Alguns parâmetros apresentaram maior influência que outros, como no caso dos coeficientes de descarga, indicando a necessidade de maior atenção ao escolher-se estes valores. Este tipo de constatação também sugere que os formatos das aberturas de janelas e portas podem influenciar significativamente no desempenho térmico dos edifícios.

Os expoentes e coeficientes de fluxo de ar pelas frestas apresentaram influências menores que 5%. Como são valores que representam os ganhos térmicos por infiltração quando as janelas estão fechadas, sua influência será sempre menor para climas que proporcionam condições para as janelas fiquem a maior parte do tempo abertas.

A variação dos Coeficientes de Pressão de vento, apesar de sua importância nos métodos de obtenção de taxas de ventilação nos ambientes, não apresentou grande influência nos resultados de simulação de desempenho térmico. Considerando diferentes fontes de valores de CP para o modelo experimental, as diferenças de graus hora de refrigeração não passaram de 3%. Esta informação atenua a grande preocupação quanto a determinação dos valores de CP, que são de difícil aquisição e considerados imprecisos quando são estimados através dos principais métodos utilizados. Porém, não se deve concluir que o formato do edifício não influencia no seu desempenho de ventilação ou térmico, pois as comparações entre coeficientes de pressão se deram para o mesmo formato de edifício.

A rugosidade do entorno, apesar de não fazer parte do edifício, também foi avaliada. Observou-se que sua determinação pode influenciar os resultados de desempenho térmico de graus hora de refrigeração em até 10% para mais, ou para menos. Esta constatação leva à conclusão de que para uma comparação entre edifícios, é importante considerar a rugosidade do meio urbano em que eles se encontram.

O modelo real foi empregado na avaliação da diferença resultante da simulação com parâmetros de ventilação natural avançados, derivados de fontes específicas, e parâmetros padrão, recomendados como default do *EnergyPlus*. Os valores de graus hora de refrigeração para os ambientes analisados apresentaram diferenças consideráveis entre as simulações padrão e avançada. A simulação padrão resultou valores maiores de graus hora de refrigeração para a maioria dos casos. A média das diferenças foi em torno de 8%, sendo a máxima diferença de 20% e a mínima de 1%.

Com base nas avaliações do modelo experimental, onde se analisou as diferenças resultantes de cada parâmetro individualmente, as grandes diferenças encontradas no modelo real podem ser provocadas principalmente pelo coeficiente de

descarga adotado. Pois o valor 1,00 de coeficiente de descarga, indicado pelo *EnergyPlus*, é considerado elevado, pois só seria aplicável a uma abertura sem atrito não indicado para nenhum tipo de abertura das bibliografias consultadas.

Não se pode concluir qual dos resultados é o mais correto, da simulação padrão ou da simulação avançada. Porém, comparando o comportamento simulado do edifício, as duas simulações apresentaram a mesma tendência de resultados, com os maiores e menores valores de graus hora de refrigeração coincidindo para os ambientes simulados pelos dois métodos.

Finalmente, os resultados das simulações com o modelo real foram empregados para a determinação do desempenho térmico do edifício. Foi adotada uma escala de graus hora de refrigeração baseada nos graus hora de refrigeração da temperatura do ar externo. Esta escala permitiu determinar o nível de desempenho térmico dos ambientes através dos seus resultados simulados. No edifício, com os resultados das simulações padrão e avançada, foram encontrados ambientes de nível de desempenho “A”, “B” e “C”. Porém, para se determinar o desempenho dos apartamentos, os graus hora dos ambientes foram ponderados pelas suas áreas. Assim, no edifício, a maioria dos apartamentos foi classificada com desempenho “B”, sendo que apenas um apartamento, da cobertura e da simulação avançada, foi classificado com desempenho “C”. Na ponderação dos desempenhos dos apartamentos para se obter uma nota para o edifício, com os resultados de ambas as simulações, padrão e avançada, o edifício completo recebeu a classificação de desempenho “B”.

5.1. Limitações do trabalho

As principais limitações para o desenvolvimento desta pesquisa estão relacionadas à obtenção dos parâmetros de ventilação e com as restrições nas simulações com o *EnergyPlus*.

Os Coeficientes de descarga pelas aberturas foram representados por um valor médio obtido em bibliografias, porém o valor deste coeficiente depende de outras variáveis além do tipo de abertura. O coeficiente de descarga também é afetado pela posição da abertura na parede e da direção de ataque do fluxo de ar. Além disso, o *EnergyPlus* só aceita um único valor de coeficiente de descarga para cada fator de abertura das portas e janelas.

Os Coeficientes e expoentes de fluxo de ar pelas frestas foram obtidos principalmente de uma fonte bibliográfica que apresenta janelas e portas de padrões construtivos diferentes dos aplicados no Brasil. Por se encontrar poucas fontes destes valores, neste trabalho os coeficientes e expoentes de fluxo de ar pelas frestas não apresentam precisão em sua determinação.

Os Coeficientes de Pressão do vento adotados nesta pesquisa foram obtidos a partir de fontes que calculam os valores de CP através de regressão ou que disponibilizam valores para certos formatos de edificações. Estes valores foram estimados, e não foram validados para aplicação.

O tipo de controle adotado nas simulações abre e fecha as janelas de forma otimizada, fechando a janela sempre que a temperatura interna estivesse menor que a externa e maior que 20°C. Este padrão não condiz com o acionamento real das aberturas em uma residência, porém para este tipo de simulação ainda não há um modelo comportamental para fazer este controle de forma mais realista.

O método adotado para determinação do desempenho térmico das edifica-

ções estudadas foi o cálculo anual do número de graus hora de refrigeração da temperatura operativa. Nenhum modelo de Conforto térmico pôde ser utilizado, pois as simulações com modelo de rede não calcula a velocidade do ar sobre as pessoas, variável necessária para determinação de conforto térmico com ventilação natural.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

No desenvolvimento desta pesquisa observaram-se ramificações e limitações do tema que podem ser exploradas para uma maior compreensão do desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas avaliadas através de simulações computacionais. Abaixo, algumas recomendações de trabalhos que podem colaborar com o desenvolvimento do conhecimento científico nesta área:

- Avaliar o desempenho do edifício considerando os modelos de conforto adaptativo;
- Analisar a influência da variação dos parâmetros de ventilação em outros climas;
- Analisar a influência da adoção de coeficientes de pressão obtidos em túnel de vento;
- Estudar edifícios com condicionamento ambiental híbrido, com ventilação natural e ar condicionado ou ventiladores;
- Estudar a integração dos resultados do EnergyPlus com modelos de CFD, para avaliação qualitativa do desempenho de ventilação e conforto dos ambientes;
- Desenvolver modelos comportamentais de controle de aberturas para ventilação em edificações residenciais.

6.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINS, R.E; PETERKA, J.A; CERMAK, J.E. Averaged Pressure Coefficients for Rectangular Buildings. In: Fifth International Conference of Wind Engineering. Fort Collins, CO. **Proceedings...** Pergamon Press, NY. 1979
- ALLARD, F; SANTAMOURIS, M. **Natural ventilation in building: a design handbook**. London: James & James, 1998. 368p.
- ALLEN, C. **Wind pressure data requirements for air infiltration calculations**. Bracknell, UK: Air Infiltration and Ventilation Centre. 1984. 124p. (Technical Note AIC 13)
- ANSI/ASHRAE Standard 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. **ASHRAE 55-2004**. Atlanta, 2004. 26 p.
- ASHRAE. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Atlanta, 2003. Cap.16
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações, parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005. 23p.
- BARDOU, P.; ARZOUMANIAN, V. **Sol y Arquitectura**. Barcelona. Gustavo Gili. 1981.
- BASTIDE,A; LAURET, P; GARDE,F; BOYER, H. Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation. **Energy and Buildings**, v.38, p.1093–1103. 2006
- BATES, B.C., Z.W. KUNDZEWICZ, S. WU AND J.P. PALUTIKOF, EDS. **Climate Change and Water**. Technical. Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva,. 2008.
- BEHLING, S; BEHLING, S. **Sol power: the evolution of solar architecture**. Munich: Prestel, 1996.
- BOWER, J. **Understanding Ventilation: How to design, select, and install residential ventilation systems**. The Healthy House Institute, 1995. 428p.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2007: Ano base 2006**. Rio de Janeiro : EPE, 2007.
- CEN. EN15251. **Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings**. Brussels. Comité Européen de Normalisation, 2007
- CLEZAR, C.A; NOGUEIRA, C.R. **Ventilação Industrial**. Florianópolis. UFSC. 1999.
- CRAWLEY, D. B. et al. *EnergyPlus*: Creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v.33, p. 319-331. 2001.
- ELLIS, P. G; TORCELLINI, P.A. Simulating tall buildings using *EnergyPlus*. In:Ninth International IBPSA Conference. **Proceedings...** Montréal, Canada. 2005

ENERGYPLUS. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2007.

EVOLA, G; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, v.38, p.491-501. 2006.

FLOURENTZOU, F; VAN DER MAAS, J; ROULET, C.-A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. **Energy and Buildings**, v.27, p.283-292. 1998

GERMANO, M.; ROULET, C.-A. Multicriteria assessment of natural ventilation potential of a site. In: International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment". **Proceedings...** Santorini, Greece. 2005

GOOD, J; FRISQUE, A; PHILLIPS, D. The role of wind in natural ventilation simulations using Airflow network models. In: Third National Conference of IBPSA. **Proceedings...**USA, 2008

GOULART, S. V.G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras.** 2ª edição. Florianópolis. Núcleo de Pesquisa em Construção Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 1998

GROSSO, M. Wind Pressure Distribution around Buildings: A Parametrical Model. **Energy and Buildings**, v.18, p.878-889. 1992

GROSSO, M; MARINO, D; PARISI, E. A Wind Pressure Distribution calculation program for multizone airflow models. In: Building Simulation 1995. **Proceedings...** Madison, EUA. 1995.

GU, L. Airflow network modeling in *EnergyPlus*. In: Building Simulation 2007. **Proceedings...** Pequim, China. 2007.

HENSEN, J.L.M; LAMBERTS, R; NEGRAO, C.O.R. A view of energy and building performance simulation at the start of the third millennium. **Energy and Buildings**, v.34, p.853-855. 2002.

JENSEN, R. L; GRAU, K; HEISELBERG, P. K. Integration of a multizone airflow model into a thermal simulation program. In: Building Simulation 2007. **Proceedings...** Pequim, China. 2007.

KALOGIROU, S; EFTEKHARI, M; MARJANOVIC, L. Predicting the pressure coefficients in a naturally ventilated test room using artificial neural networks. **Building and Environment**, v.38, p.399-407. 2003

KHAN, N; SU, Y; RIFFAT, S.B. A review on wind driven ventilation techniques. **Energy and Buildings**, v.40, p. 1586-1604. 2008

KNOLL, B; PHAFF, J. C; GIDS W.F. Pressure Coefficient Simulation Program. **Air Infiltration Review**, v.17, no. 3. 1996.

KURABUCHI, T; ENDO, T.; OHBA, M.; GOTO, T.; AKAMINE, Y. Local dynamic similarity concept as applied to evaluation of discharge coefficients of ventilated buildings. Part 1: Basic idea and underlying wind tunnel tests. In: International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. **Proceedings...** Santorini, Grécia. 2005

LABEEE. **Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Versão aprovada para testes pelo GT edificações. 2007

LAMBERTS, R.; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R.; GOULART, S.; CARLO, J; WESTPHAL, F.; PONTES, R.O. Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos. In: ENCAC 2007. **Anais...** Ouro Preto, 2007.

LAMBERTS, R; CARLO, J. Uma discussão sobre a regulamentação de EEE. In: Mercofrio 2004 - IV Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul. **Anais...** Curitiba, 2004.

LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**. Bracknell, UK: AIVC. 1986.

LIMB, M. **Infiltration and Ventilation Glossary**. Bracknell, UK: Air Infiltration and Ventilation Centre. 1992. (Technical Note AIVC36)

LIPING, W; HIEN, N.W. Coupled simulations for naturally ventilated rooms between building simulation (BS) and computational fluid dynamics (CFD) for better prediction of indoor thermal environment. **Building and Environment**, v.44, p.95-112. 2008.

LOMAS, K. J. Architectural design of an advanced naturally ventilated building form. **Energy and Buildings**, v.39, p. 166-181. 2007.

MAGHRABI, A.A; SHARPLES, S. Air flow characteristics through modulated louvered windows. In: PLEA '99 . **Proceedings...** Brisbane, Australia, 1999.

MATOS, M. **Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MOESEKE, G, V; GRATIA, E; REITER, S; HERDE, A. Wind pressure distribution influence on natural ventilation for different incidences and environment densities. **Energy and Buildings**, v.37, p.878-889. 2005.

OLOFSSON, T; MEIER, A.; LAMBERTS, R. Rating the Energy Performance of Buildings. **International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings**, v. 3, 2004. (disponível em: www.bvv.kth.se/avd/byte/leas)

Perfil Socioeconômico de Campo Grande. **Instituto Municipal de Planejamento Urbano e de Meio Ambiente**. PLANURB. Campo Grande, MS. 2008.

PNAD. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Empregos e Rendimento. Rio de Janeiro, 2005.

PROCEL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Canal do consumidor: Consumo de Eletrodomésticos**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br/procel>>. Acesso em: novembro 2008.

RAJA, I.A.; NICOL, J.F; McCARTNEY, K.J; HUMPHEREYS, M.A. Thermal comfort: use of controls in naturally ventilated buildings. **Energy and Buildings**, v.33, p.235-244. 2001.

SANTAMOURIS, M. Adaptive thermal comfort and ventilation. **AIVC: Ventilation Information Paper**, v.12, 2006.

SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. **Building Ventilation: The state of the Art**. Londres: Earthscan. 2006.

SHARAG-ELDIN, A. A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments. **Solar Energy**, v.81, p.52–61. 2007.

STAVRAKAKIS, G.M; KOUKOU, M.K; VRACHOPOULOS, M.G; MARKATOS, N.C. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. **Energy and Buildings**, v.40, p. 1666-1681. 2008.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlation for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-ventilation air Flow. **ASHRAE Transactions**, v.94, Part 1: p.243-266. 1988.

TAN G, GLICKSMAN R. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. **Energy and Buildings**, v.37, p.1049-1057. 2005.

TAVARES, S. F. **Metodologia para análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

VERSAGE, R. **A ventilação natural como estratégia visando proporcionar conforto térmico e eficiência energética no ambiente interno**. Relatório de iniciação científica. Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2005. Disponível em <www.dec.ufms.br/lade/docs/dt/rogerio.pdf>.

WALKER, I.S. **Pressure coefficients on sheltered building**. Air Infiltration and Ventilation Center. Technical Report, v13, n.4. 1992

WILSON, D.J; WALKER, I.S. Wind shelter effects on a row of houses. In: 12th AIVC Conference. **Proceedings...** Ottawa, Canada, 1991.

ZHAI, Z; CHEN, Q; HAVES, P; KLEMS, J. H. On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. **Building and Environment**, v.37, p. 857 – 864. 2002.

ZHOU, J; ZHANG, G; LIN, Y, LI, Y. Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**. V.40 p. 979–986. 2008